



TUGAS AKHIR - TM141585

**ANALISIS PENGARUH VARIASI JENIS AGREGAT DAN
MODULUS DISTRIBUSI UKURAN PARTIKEL TERHADAP
SIFAT FISIK DAN THERMAL REFRAKTORI CASTABLE
 Al_2O_3 - SiO_2**

PRATITIS YUNIARSIH
NRP 02111545000043

Dosen Pembimbing
Suwarno, ST., MSc., Ph.D

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2018



TUGAS AKHIR - TM141585

**ANALYSIS EFFECT OF TYPES OF AGGREGATE
AND PARTICLE SIZE DISTRIBUTION ON
PHYSICAL AND THERMAL PROPERTIES
REFRACTORY CASTABLE $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$**

PRATITIS YUNIARSIH
NRP 02111545000043

Advisor Lecturer
Suwarno, ST., MSc., Ph.D

MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA
2018

**ANALISIS PENGARUH VARIASI JENIS AGREGAT
DAN MODULUS DISTRIBUSI UKURAN PARTIKEL
TERHADAP SIFAT FISIK DAN THERMAL
REFRAKTORI CASTABLE $Al_2O_3-SiO_2$**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

PRATITIS YUNIARSIH

NRP. 02111545000043

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Suwarno, ST., MSc., Ph.D
NIP. 198005202005011003
2. Dr. Eng. Sutikno, S.T., M.T
NIP. 197407032000031001
3. Indra Sidharta, S.T., M.Sc.
NIP. 198006192006041004
4. Ir. Hari Subiyanto, M.Sc.
NIP. 196006231988031002



(Pembimbing)

(Penguji I)

(Penguji II)

(Penguji III)

SURABAYA

JANUARI, 2018

ANALISIS PENGARUH VARIASI JENIS AGREGAT DAN MODULUS DISTRIBUSI UKURAN PARTIKEL PADA SIFAT FISIK DAN THERMAL REFRAKTORI CASTABLE $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$

Nama Mahasiswa : Pratitis Yuniarsih
NRP : 02111545000043
Jurusan : Teknik Mesin FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Suwarno, S.T., M.Sc., Ph.D

Abstrak

Refraktori merupakan material keramik yang tahan terhadap temperatur dan beban tinggi bahkan dalam kondisi lingkungan rentan korosi serta abrasi sekalipun sehingga biasa disebut sebagai material tahan api. Oleh karena itu aplikasi refraktori banyak dijumpai pada operasi-operasi yang berlangsung pada temperatur tinggi seperti industri logam, petrokimia, sistem pembangkit dan sebagainya. Castable adalah salah satu jenis refraktori monolitik yang cukup banyak digunakan di industri dimana karakteristik utamanya yaitu distribusi ukuran partikel yang pada dasarnya mengendalikan sifat kemampuan untuk mengalir bersama dengan penambahan bahan-bahan kecil, setting dan kekuatan serta sistem pengikat (binder) yang menentukan sifat-sifat pada temperatur tinggi.

Penelitian ini diawali dengan persiapan material, penyaringan lalu pembentukan. Perancangan percobaan dilakukan dengan metode faktorial berupa dua faktor tiga level. Faktor pertama adalah jenis agregat yang digunakan berupa mullite, bauxite dan white fused alumina. Faktor kedua merupakan berbagai distribusi ukuran partikel ditentukan menurut model Andreassen, dengan modulus distribusi (q) 0,26, 0,28, dan 0,3 untuk tipe vibratable. Pengujian yang akan dilakukan untuk mengetahui sifat fisik dan thermal refraktori meliputi uji massa jenis, porositas, kuat tekan, dan konduktivitas panas.

Dari penelitian didapatkan hasil bahwa dari ketiga jenis agregat, white fused alumina memiliki nilai massa jenis, kuat tekan, konduktivitas panas paling tinggi dan nilai porositasnya paling rendah. Sedangkan jenis agregat mullite memiliki nilai massa jenis, kuat tekan, konduktivitas panas paling rendah dan nilai porositasnya paling tinggi. Semakin tinggi nilai modulus distribusi ukuran partikel (qPSD) maka semakin tinggi pula nilai massa jenis, kuat tekan, konduktivitas panas namun nilai porositasnya rendah.

Kata kunci : refraktori, monolitik, castable, Al_2O_3 - SiO_2 , modulus distribusi ukuran partikel, model Andreassen.

**ANALYSIS EFFECT OF TYPES OF AGGREGATE AND
PARTICLE SIZE DISTRIBUTION ON PHYSICAL AND
THERMAL PROPERTIES OF REFRACTORY
CASTABLE Al_2O_3 - SiO_2**

Name : Pratitis Yuniarsih
NRP : 02111545000043
Department : Teknik Mesin FTI-ITS
Advisor Lecturer : Suwarno, S.T., M.Sc., Ph.D

Abstract

Refractories are ceramic materials that are resistant to temperature and high. Therefore, refractory applications are often found in metal industry, petrochemical, generating system and so on. Based on the shape of the refractory is divided into refractory shaped and unformed (monolithic). Castable is one type of monolithic refractory that is widely used in industries where it features to flow along with the addition of small materials, settings and strengths as well as binders that determine properties at high temperatures.

This research was initiated by material preparation, screening and casting. Experimental design is done by factorial method in the form of two factor three level. The first factor is the type of aggregate such as mullite, bauxite and white fused alumina. The second factor is the particle size distribution modulus determined according to the Andreassen model, with the distribution modulus (q) 0.26, 0.28, and 0.3 for the vibratable type. Tests to be performed to determine the physical and thermal properties of refractories include bulk density, porosity, cold crushing strength, and thermal conductivity.

The result of this research are showed that from three different alumina aggregates, namely mullite, bauxite and white fused alumina, white fused alumina has the highest bulk density, cold crushing strength, and thermal conductivity but has the lowest porosity. While mullite has the lowest bulk density, cold

crushing strength, and thermal conductivity but has the highest porosity. The higher the modulus value of particle size distribution (qPSD), the higher the bulk density value, cold crushing strength,, and thermal conductivity but lowest porosity.

Keyword : refractory, castable, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$, particle size distribution, Andreassen model, modulus distribution.

KATA PENGANTAR

Dengan mengucapkan rasa syukur kepada Allah SWT, maka Tugas Akhir dengan judul “**ANALISIS PENGARUH VARIASI JENIS AGREGAT DAN MODULUS DISTRIBUSI UKURAN PARTIKEL TERHADAP SIFAT FISIK DAN THERMAL REFRAKTORI CASTABLE Al_2O_3 - SiO_2** ” telah selesai disusun dalam rangka memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar Sarjana Teknik Mesin – Depaertemen Teknik Mesin – Fakultas Teknologi Industri – Institut Teknologi Sepuluh Nopember – Surabaya.

Dalam penyusunan Tugas Akhir ini, penulis menyadari bahwa penyusunan ini tidak akan berhasil apabila tanpa ada bimbingan, bantuan, dukungan dan kerjasama dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Kedua orang tua tercinta (**Adi Kusno dan Siti Zulaikah**) dan kakak (**Diah Apriliani Adiningsih**) yang selalu memberi restu, nasihat, do'a dan dukungan.
2. Bapak **Suwarno, ST., MSc., Ph.D** selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberi pengarahan serta bimbingan kepada penulis untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini.
3. Ibu **Ita** selaku ketua laboratorium , Bapak **Sukirman** dan Bapak **Markasan** selaku petugas laboratorium **PT.Loka Refractories**.
4. Bapak **Ir. Hari Subiyanto, MSc, Indra Sidharta, ST., MSc, Dr. Eng. Sutikno, ST., MSc.**, selaku dosen penguji yang banyak memberikan masukan dan saran demi kesempurnaan Tugas Akhir ini.
5. Bapak **Ir. Bambang Pramujati, M.Sc.Eng, Ph.D.** selaku Ketua Departemen Teknik Mesin FTI-ITS.
6. Bapak **Dr. Wawan Aries Widodo, ST., MT.** selaku dosen wali.

7. Seluruh Bapak dan Ibu dosen S-1 Teknik Mesin FTI-ITS yang telah membimbing penulis selama duduk di bangku perkuliahan.
8. **Tio Agathama Putra** sebagai *partner* tugas akhir atas bantuan dan kerjasamanya.
9. **Franciska Estinita**, dan teman-teman lintas jalur angkatan 2015 semoga persahabatan dan kebersamaan kita tetap utuh selamanya..
10. **Ridha Wildania, Suci Wuri G., Angelia Hermiati Ayu W. dan Laili Khusnul Khotimah** terima kasih atas do'a dan dukungannya.

Penulis menyadari bahwa tidak ada yang sempurna di dunia ini, demikian juga dalam Tugas Akhir ini. Oleh karena itu, dengan segala kerendahan hati penulis mengharapkan kritik dan saran dari pembaca untuk perbaikan di masa mendatang. Semoga Tugas Akhir ini bermanfaat bagi kita semua, Amin.

Surabaya, Januari 2018

Penulis

DAFTAR ISI

Halaman Judul	i
Lembar Pengesahan	iii
Abstrak	iv
<i>Abstract</i>	vi
Kata Pengantar	viii
Daftar Isi	x
Daftar Gambar	xiv
Daftar Tabel	xvi

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	3

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Refraktori	5
2.2 Refraktori Monolitik	6
2.3 Refraktori Castable	7
2.3.1 Agregat	7
2.3.2 Filler	8
2.3.3 Binder	9
2.3.4 Additif	9
2.4 Distribusi Ukuran Partikel	10
2.5 Penyaringan (<i>Screening</i>)	11
2.6 Sifat-sifat Refraktori	12
2.7 Pengujian	14
2.7.1 Pengujian Massa Jenis (<i>Bulk Density</i>)	14
2.7.2 Pengujian Porositas (<i>Apparent Porosity</i>)	14
2.7.3 Pengujian Kuat Tekan (<i>Cold Crushing Strength</i>)	15

2.7.4 Pengujian Konduktivitas Panas (<i>Thermal Conductivity</i>).	17
2.7 Penelitian Terdahulu.....	19

BAB III METODOLOGI

3.1 Diagram Alir Penelitian	21
3.2 Persiapan Sampel.....	22
3.2.1 Raw Material.....	22
3.2.2 Penyaringan (<i>Screening</i>).....	25
3.2.3 Pencampuran (<i>Mixing</i>).....	25
3.2.4 Pembentukan (<i>Casting</i>).....	25
3.3 Desain Eksperimen	26
3.4 Pembuatan Spesimen	26
3.4.1 Proses Pembuatan Spesimen untuk Pengujian Massa Jenis, Porositas dan Kuat tekan.....	26
3.4.2 Proses Pembuatan Spesimen untuk Pengujian Konduktivitas Panas	27
3.5 Pengujian	28
3.5.1 Pengujian Massa Jenis (<i>Bulk Density</i>) dan Porosity (<i>Apparent Porosity</i>)	28
3.5.2 Pengujian Kuat Tekan (<i>Cold Crushing Strength</i>)...	29
3.5.4 Pengujian Konduktivitas Panas (<i>Thermal Conductivity</i>).....	31

BAB IV DATA DAN ANALISA HASIL PENELITIAN

4.1 Pengujian Massa Jenis dan Porositas (<i>Bulk Density and Apparent Porosity</i>)	33
4.1.1 Data Hasil Pengujian Massa Jenis dan Porositas	33
4.1.2 Analisa dan Pembahasan Pengujian Massa Jenis ...	35
4.1.3 Analisa dan Pembahasan Pengujian Porositas	37
4.2 Pengujian Kuat Tekan (<i>Cold Crushing Strength</i>)	38
4.2.1 Data Hasil Pengujian Kuat Tekan.....	39
4.2.2 Analisa dan Pembahasan Pengujian Kuat Tekan....	40

4.3 Pengujian Konduktivitas Panas	42
4.3.1 Data Hasil Pengujian Konduktivitas Panas (<i>Thermal Conductivity</i>).....	42
4.3.2 Analisa dan Pembahasan Pengujian Konduktivitas Panas	44

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan	67
5.2 Saran	67

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Refraktori.....	6
Gambar 2.2	Analisa dengan saringan bertingkat.....	6
Gambar 2.3	Pengujian kuat tekan.....	8
Gambar 2.4	Instalasi pegujian konduktivitas panas	8
Gambar 3.1	Diagram alir penelitian	9
Gambar 3.2	Jenis agregat	13
Gambar 3.3	Peralatan penyaringan.....	14
Gambar 3.4	Perlengkapan pembuatan spesimen	16
Gambar 3.5	Perlengkapan pembuatan spesimen konduktivitas panas	16
Gambar 3.6	Perlengkapan pengujian massa jenis dan porositas	18
Gambar 3.7	Ilustrasi pengujian massa jenis dan porositas	20
Gambar 3.8	Alat uji kuat tekan.....	20
Gambar 3.9	Alat uji konduktivitas panas	21
Gambar 4.1	Spesimen uji massa jenis, kuat tekan, porositas .	33
Gambar 4.2	Grafik hasil pengujian massa jenis	35
Gambar 4.3	Grafik hasil pengujian porositas	37
Gambar 4.4	Grafik hasil pengujian kuat tekan	40
Gambar 4.5	Spesimen uji konduktivitas panas.....	42
Gambar 4.6	Grafik hasil pengujian konduktivitas panas.....	44

(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Kisaran komposisi castable	5
Tabel 2.2	Jenis Agregate	7
Tabel 2.3	Filler dan Modifier Refraktori	8
Tabel 2.4	Jenis Aditif dan Fungsinya	9
Tabel 2.5	Penelitian Terdahulu.....	19
Tabel 3.1	Spesifikasi Agregat	23
Tabel 3.2	Ukuran Partikel dan CPFT untuk $q=0,26$	23
Tabel 3.3	Kisaran ukuran dan jumlah partikel $q=0,26$	23
Tabel 3.4	Ukuran Partikel dan CPFT untuk $q=0,28$	24
Tabel 3.5	Kisaran ukuran dan jumlah partikel $q=0,28$	24
Tabel 3.6	Ukuran Partikel dan CPFT untuk $q=0,3$	24
Tabel 3.7	Kisaran ukuran dan jumlah partikel $q=0,3$	24
Tabel 3.8	Faktor dan level penelitian	26
Tabel 4.1	Data Hasil Pengujian Massa Jenis dan Porositas...	34
Tabel 4.2	Data Hasil Pengujian Kuat Tekan	39
Tabel 4.3	Data Hasil Pengujian Konduktivitas Panas	42

(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1. 1 Latar Belakang

Refraktori merupakan material keramik yang tahan terhadap temperatur dan beban tinggi bahkan dalam kondisi lingkungan rentan korosi serta abrasi sekalipun sehingga biasa disebut sebagai material tahan api. Oleh karena itu aplikasi refraktori banyak dijumpai pada industri logam, petrokimia, sistem pembangkit dan sebagainya.

Berdasarkan bentuknya refraktori dibagi menjadi refraktori berbentuk dan tidak berbentuk (monolitik). Refraktori monolitik merupakan campuran butiran mineral kering (agregat) dimana ukuran butiran dan distribusinya bervariasi dengan bahan pengikat (*binder*) sehingga diperoleh campuran yang homogen. Seiring dengan perkembangan teknologi permintaan akan kebutuhan refraktori monolitik mengalami peningkatan karena berbagai kelebihannya seperti mengeliminasi sistem sambungan, proses aplikasi lebih cepat, kemudahan dalam penanganan dan pengangkutan, perbaikan lebih mudah karena tanpa mengganggu keseluruhan struktur sehingga menghemat waktu, bahan dan tenaga kerja. Castable adalah salah satu jenis refraktori monolitik yang cukup banyak digunakan di industri dimana karakteristik utamanya yaitu distribusi ukuran partikel yang pada dasarnya mengendalikan sifat kemampuan untuk mengalir bersama dengan penambahan bahan-bahan kecil, dan sistem pengikat (*binder*) yang menentukan sifat-sifat pada temperatur tinggi.

Masih kurangnya penelitian mengenai refraktori pada umumnya dan refraktori *castable* pada khususnya sehingga tidak sedikit yang kurang memahami sifat/karakteristik refraktori. Penelitian ini dilakukan bertujuan untuk mengetahui pengaruh modulus distribusi ukuran butiran dan jenis agregat terhadap massa jenis, kuat tekan serta konduktivitas panas. Harapan agar penelitian ini dapat memberikan kontribusi dalam segi pengetahuan pada perkembangan industri refraktori di Indonesia.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan uraian dari latar belakang, rumusan masalah dari penelitian ini adalah :

1. Bagaimana pengaruh jenis agregat terhadap terhadap sifat fisik dan thermal refraktori castable $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$.
2. Bagaimana pengaruh variasi modulus distribusi ukuran partikel agregat terhadap sifat fisik dan thermal refraktori castable $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$.

1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dari penelitian ini adalah :

1. Bahan yang digunakan untuk refraktori *castable* diasumsikan memiliki komposisi yang homogen.
2. Metode pencampuran dilakukan secara konvensional dengan variasi modulus distribusi ukuran butiran agregat (q) sebesar 0.26, 0.28 dan 0.3 dengan secar-71 sebagai pengikat (*binder*) bernilai konstan yaitu 5 wt %.
3. Variasi jenis dari agregat refraktori castable yaitu *mullite*, *bauxite*, dan *white fused alumina* dengan secar-71 sebagai pengikat (*binder*) bernilai konstan yaitu 5%.
4. Pembentukan spesimen uji menggunakan metode tuang cetak dimana bentuk disesuaikan dengan alat uji.
5. Pengujian terbatas pada pengaruh jenis agregat dan modulus distribusi ukuran partikel terhadap sifat fisik berupa massa jenis, porositas, kuat tekan serta sifat thermal yaitu konduktivitas panas.

1. 4 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk :

1. Mengetahui pengaruh variasi jenis agregat terhadap sifat fisik yaitu massa jenis, kuat tekan dan porositas serta sifat thermal yaitu konduktivitas panas refraktori castable $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$.
2. Mengetahui pengaruh variasi modulus distribusi ukuran partikel terhadap sifat fisik yaitu massa jenis, kuat tekan dan porositas serta sifat thermal yaitu konduktivitas panas refraktori castable $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$.

1. 5 Manfaat Penelitian

Dari penelitian ini akan diaplikasikan pengetahuan mengenai pengaruh jenis agregat dan modulus distribusi ukuran partikel terhadap sifat fisik dan thermal refraktori castable.

(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Refraktori

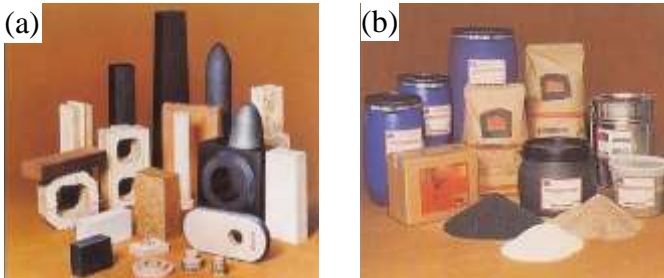
Refraktori didefinisikan sebagai material konstruksi yang mampu mempertahankan bentuk dan kekuatannya pada temperatur sangat tinggi dibawah beberapa kondisi seperti tegangan mekanik dan serangan kimia dari gas-gas panas, cairan atau leburan dan semi leburan dari gelas, logam atau slag [5]. Menurut ASTM C-71 mendefinisikan refraktori sebagai bahan anorganik bukan logam yang memiliki sifat kimia dan fisik sedemikian rupa sehingga dapat digunakan untuk bahan konstruksi struktur atau sebagai komponen suatu sistem yang dikenai lingkungan panas dengan suhu minimum 1.000°F (538°C) [2]. Karena kemampuan tersebut maka bahan refraktori umumnya digunakan pada operasi-operasi yang berlangsung pada temperatur tinggi, banyak dijumpai pada industri logam, petrokimia, sistem pembangkit dan sebagainya.

Syarat-syarat umum yang harus dimiliki oleh material refraktori sebagai berikut [2]:

1. Tahan pada temperatur tinggi dan mampu menangkap panas di area yang diinginkan.
2. Tahan terhadap gangguan dari logam cair, gas panas, atau terak,
3. Tahan terhadap beban dan getaran.
4. Tahan terhadap kontaminasi dari material.
5. Mempertahankan kestabilan dimensi setelah atau selama siklus thermal.
6. Tahan terhadap serangan lingkungan yang terkait dengan oksidasi.

Refraktori dapat dibedakan dalam beberapa jenis baik berdasarkan komposisi kimia penyusunnya, komposisi mineral penyusunnya dan metode pembentukkannya.

Secara umum refraktori dibedakan berdasarkan bentuknya yaitu refraktori berbentuk (contohnya bata tahan api) dan tidak berbentuk/monolitik (contohnya semen tahan api).



Gambar 2.1 Refraktori (a) berbentuk (b) tidak berbentuk/monolitik

2. 2. Refraktori Monolitik

Refraktori yang tidak terbentuk juga disebut monolitik yaitu tidak memiliki bentuk spesifik. Umumnya terdiri dari partikel refraktori kasar (agregat), fiberglass, dan pengikat.

Bahan baku yang digunakan untuk persiapan refraktori monolitik tidak ada perbedaan yang signifikan dengan yang digunakan untuk menyiapkan bata refraktori. Pada refraktori monolitik tidak diperlukan proses pembentukan tekan / cetak tekan dan pembakaran pada saat proses pembentukannya, seperti yang dilakukan pada bata refraktori.

Performa refraktori monolitik tergantung dari bahan baku yang digunakan dalam formulasi, sehingga material memiliki peranan penting pada produk akhir dan perlu mendapat perhatian khusus. Kelebihan dari refraktori monolitik dibandingkan dengan refraktori berbentuk (bata) meliputi mengeliminasi sistem sambungan, proses aplikasi lebih cepat, kemudahan dalam penanganan dan pengangkutan, perbaikan lebih mudah karena tanpa mengganggu keseluruhan struktur sehingga menghemat penggunaan energi, waktu pembuatan, bahan, tenaga kerja serta meningkatkan produktivitas.

Ada berbagai jenis refraktori monolitik yaitu plastics, ramming mixes, mortars, coatings, castables/ pumpables, dan gunning mixes [3].

2.3 Refraktori Castable

Sering juga disebut beton tahan api. Refraktori castable tersusun dari bahan refraktori berupa butiran serbuk mineral (agregat) yang ukuran butir dan distribusi butirannya bervariasi yang dicampur dengan bahan perekat (*binder*) dengan atau tanpa ditambah aditif. Refraktori castable dalam keadaan kering untuk dicampur dengan air sebelum pemasangan. Biasanya cetak (*cast*) atau vibrated (getar) dengan cara yang sama seperti beton biasa, castables juga bisa dipasang dengan trowelling (sekop), pneumatic gunning atau sesekali ramming [4].

Dalam setiap komposisi, proporsi masing-masing komponen yang digunakan bervariasi castable untuk mencapai sifat fisik dan kimia yang diinginkan sesuai aplikasi. Untuk castables konvensional, pencampuran jumlah air pengecoran berkisar antara 8-15% (tergantung pada basis agregat dan jenis semen yang digunakan). Kisaran umum jumlah komponen dalam castable refraktori ditunjukkan pada tabel berikut.

Tabel 2.1 Kisaran Komposisi Castable

Refractory Castable Composition	
1. Aggregate	40–80%
2. Modifiers	5–30%
3. Bond agents	2–50%
4. Admixtures	<1%

2.3.1 Agregat

Agregat adalah komponen matriks utama dalam refraktori castable dan biasanya terdiri dari 40-80% dari jumlah campuran castable sehingga agregat disebut juga sebagai kerangka dasar dari refraktori castable. Ukuran agregat dapat berkisar dari 20 mm

sampai 300 mm (50Mesh). Terdapat berbagai jenis agregat yang tersedia (tabel 2.2) dapat diformulasikan dari satu atau kombinasi agregat untuk mencapai kimia, mineralogi, dan sifat fisik yang diinginkan. Pemilihan agregat merupakan hal yang penting dan kritis, karena sifat akhir dari produk castable ditentukan oleh komposisi kimia agregat dan karakteristik fisik.

Tabel 2.2 Jenis Agregat

Primary Alumina and Alumino-Silicate Aggregates		
Aggregate	Al ₂ O ₃ /SiO ₂	Max. service limit ^a (°C)
Alumina—tabular or white fused	99 + %/0%	1870
Alumina—brown fused	94–98%/1–2%	1760
Bauxite—S.A. and Chinese	84–90%/5–7%	1760
Mullite—sintered or fused	74–76%/19–24%	1760
Bauxitic kaolin—calcined	58–70%/26–37%	1760
Andalusite	57–61%/38–40%	1760
Calcined kaolin and flint clay	40–47%/49–55%	1650
Pyrophyllite	13–30%/65–80%	1425
Fused silica	0%/99.7+%	1370

^aIn optimum castable formulation.

2. 3. 2 Filler

Untuk mengisi ukuran partikel dan untuk memberikan atribut lain yang diinginkan seperti pengendalian ekspansi, modifikasi kimia / mineralogi, peningkatan ikatan, dan lain-lain, pengisi dan *modifier* ditambahkan ke komposisi refraktori castable. Pengisi dan *modifier* dapat mengukur fraksi berukuran kecil dari mineral yang sama yang digunakan sebagai agregat atau mineral lain yang dipilih untuk peningkatan komposisi. Beberapa bahan pengisi yang umum digunakan dalam komposisi refraktori castable dapat dilihat di Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Filler dan Modifier Refraktori

Common Refractory Fillers and Modifiers		
Filler/Modifier	Chemical formula	Function
Fine milled aggregates	Various	Chemistry/mineralogy adjustment, bond modification/development
Alumina		
Calcined	$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$	Chemistry adjustment, bond modification/development
Reactive	$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$	Flow/rheology control, bond modification/development
Silica		
Quartz	SiO_2	Shrinkage control ($\sim 800^\circ\text{C}$)
Fume	SiO_2	Flow/rheology characteristics, bond modification/development
Kyanite	$3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2$	Shrinkage control ($1325^\circ - 1410^\circ\text{C}$), chemistry/mineralogy adjustment
Clay (fire, ball, bentonite)	Hydrated aluminosilicate	Filler, flow/rheology control
Zircon	ZrSiO_4	Reduce metal, slag, alkali attack
Graphite/Carbon	C	Reduce metal, slag attack
Fly ash	Varies	Low-temperature filler

2. 3. 3 Binder

Calcium alumina cement (CAC) adalah pengikat yang paling populer digunakan dalam sistem castable, dimana jika dicampur dengan air akan mengikat partikel-partikel agregat secara bersama dalam ikatan hidrolis yang mengeras pada suhu ruang membentuk refraktori.

Berdasarkan kandungan semen (CaO) castable terbagi menjadi beberapa jenis yaitu *conventional cement* ($\text{CaO} > 2,5\%$), *ultra-low cement* ($2,5 > \text{CaO} > 1,0\%$), *ultra-low cement* ($1,0\% > \text{CaO} > 0,2\%$) dan *cement free* ($\text{CaO} < 0,2\%$). Seiring dengan perkembangan teknologi kandungan semen jenis konvensional telah dikurangi karena semakin tinggi kandungan semen tinggi maka akan menyebabkan penambahan air yang tinggi pula, sehingga kekuatannya akan lebih rendah setelah proses dehidrasi dan pemanasan pada suhu tinggi.

2. 3. 4 Aditif

Untuk melengkapi formulasi refraktori castable, berbagai jenis aditif digunakan untuk memodifikasi karakteristik aliran (*rheologi*) dari castable. Aditif digunakan dalam formulasi tunggal dan digunakan dalam jumlah yang sangat kecil biasanya 0,2%.

Penggunaan dan pengendalian yang tepat kombinasi aditif / campuran adalah aspek penting mendesain campuran castable. Pada tabel 2.4 mencantumkan jenis aditif dan fungsinya yang umum digunakan dalam pembuatan refraktori castable.

Tabel 2.4 Jenis Aditif dan Fungsinya [3]

Common Additives/Admixtures Used in Refractory Castables					
Additive	Function				
	Accelerator	Retarder	pH control	Water reducer	Rheology modifier
Lithium carbonate	×				
Calcium hydroxide	×		×		
Sodium carbonate	×		×		
Sodium bicarbonate			×		
Sodium citrate		×		×	×
Sodium phosphate(s)		×		×	×
Sodium polyacrylate				×	×
Polyacrylate				×	×
Citric acid		×			
Boric acid		×			

2. 4. Distribusi Ukuran Partikel (*Particle Size Distribution*)

Pada refraktori castable, sebagian besar porositas terjadi karena dua penyebab yaitu berkaitan dengan kandungan air dan kepadatan butiran yang tergantung pada distribusi ukuran partikel diindikasikan dengan nilai modulus distribusi (q) pada persamaan Andreasen. Teori tentang pengepakan partikel dapat digunakan untuk menentukan distribusi ukuran partikel optimum. Salah satu yang paling umum digunakan adalah model Andreassen,

$$CPFT = \left(\frac{d}{D}\right)^q \times 100\%$$

Dimana:

- CPFT : Persentase kumulatif lebih rendah dari
- d : ukuran butiran
- D : maksimum ukuran butiran
- q : modulus distribusi

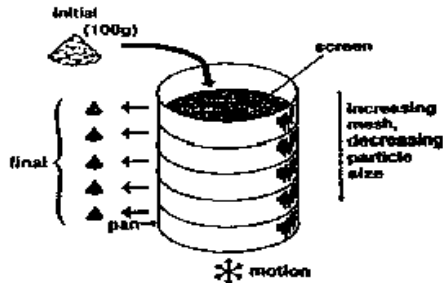
Distribusi ukuran butiran castable refraktori memiliki efek penting terhadap kepadatan pengepakan dan kemampuan alirnya. Pencapaian kerapatan kemasan 100% tidak mungkin dilakukan secara praktis, kontrol terhadap distribusi ukuran partikel dari castable penting agar distribusi ukuran partikel menentukan apakah castable adalah jenis *vibratable* atau *self-flowing*.

Pada refraktori castable untuk mencapai *self-flow*, nilai q harus antara 0.21 – 0.26. Pada nilai q yang rendah, komposisi batch mengandung partikel halus yang lebih banyak dimana dapat membantu sifat alir yang lebih baik. Studi terbaru menunjukkan bahwa aliran yang baik dapat dicapai dengan nilai yang tidak melebihi 0,3. Castables yang memiliki nilai q mendekati 0,3 adalah jenis *vibratable*. [15]

2. 5. Penyaringan (*Screening*)

Penyaringan (*screening*) merupakan suatu teknik yang paling umum digunakan untuk analisa ukuran partikel dengan cepat. Proses dasar dari *screening* adalah lolosnya material atau pemakanan dari sebuah screen dengan beberapa bukaan dari sebuah ukuran. Partikel yang lolos dari saringan adalah partikel yang lebih kecil, dan partikel yang tertinggal adalah partikel yang lebih besar. [7]

Kisi-kisi segi empat dari kawat dengan ukuran atau jarak tertentu disebut mesh. Ukuran mesh ditunjukkan dari jumlah kawat per unit panjang. Ukuran bukaan merupakan kebalikan dari ukuran mesh; ukuran mesh menandakan ukuran bukaan yang kecil, atau sebaliknya. Hal yang paling penting dalam penentuan ukuran mesh terletak pada jumlah kawat tiap inchi. Sebagai contoh, mesh 200 menyatakan ada 200 kawat per inchi atau 127 μm jarak antar pusat kawat. Ukuran mesh ini diameter kawatnya adalah 52 μm , dengan demikian ukuran bukaannya adalah 75 μm . [7]



Gambar 2.2 Analisa dengan Saringan Bertingkat.

Ukuran bukaan paling kecil berada di paling bawah. Serbuk dimasukkan pada bagian rak paling atas dan kemudian digetarkan selama 15 menit. Untuk analisa partikel, sebagai contoh ukuran dari 100 gram biasanya cukup dengan menggunakan diameter screen 20 cm. Setelah digetarkan serbuk yang masuk kedalam masing-masing interval ukuran ditimbang dan dihitung prosentasenya tiap interval ukuran.

Partikel serbuk yang melewati suatu ukuran mesh ditandai dengan tanda (-) dan yang tertahan di suatu tingkat mesh diberi tanda (+). Sebagai contoh, -100/+200 mesh artinya serbuk tersebut melewati ukuran 100 mesh tetapi tidak bisa melewati ukuran 200 mesh.

2. 6 Sifat-Sifat Refraktori

Agar dapat memenuhi kebutuhan aplikasinya, refraktori harus memiliki sifat-sifat khusus yang diklasifikasikan sebagai berikut [3] :

- Sifat fisik : *Density, Porosity, Strength, Abrasion*
- Sifat thermal : *Thermal shock, Thermal conductivity, Thermal diffusivity*
- Sifat kimia : *Corrosion/erosion*

Pada penelitian ini beberapa sifat refraktori yang akan diobservasi adalah :

1. Massa Jenis (*Bulk Density*)

Bulk Density adalah suatu ukuran rasio berat refraktori terhadap volume yang ditempatinya. *Bulk density* umumnya dinyatakan dalam pound per cubic foot (pcf) untuk satuan British atau kilogram per meter kubik (kg/m^3) dalam satuan internasional. Berat jenis refraktori merupakan sebuah pengukuran tidak langsung dari kapasitas panas atau kemampuan untuk menyimpan panas. Selain itu, sifat fisik lainnya, seperti kekuatan, abrasi, dan permeabilitas gas, sering dikaitkan dengan kepadatan dan porositas refraktori. Secara umum, semakin tinggi densitasnya, semakin rendah porositas.

2. Porositas

Keberadaan porositas dalam produk refraktori sangat berpengaruh terhadap sifat bahan refraktori seperti sifat mekanik dan termal. Porositas merupakan perbandingan volume pori-pori (yaitu volume yang ditempati oleh fluida) terhadap volume total bahan. Semakin rendah porositas yang terbentuk pada refraktori maka massa jenis akan semakin tinggi dan refraktori akan semakin padat. Porositas mulai terbentuk saat proses pembentukan material yang berasal dari adanya ruang kosong yang terjadi di antara partikel saat kompaksi butir/serbuk pada proses pembuatan refraktori.

3. Kekuatan (*Strength*)

Kekuatan bisa diukur di suhu ruangan digunakan untuk mengevaluasi tingkat pembentukan ikatan selama produksi dan juga menunjukkan kemampuan untuk penanganan dan pengiriman tanpa kerusakan dan tahan abrasi dan aplikasi pada suhu yang relatif rendah. Uji kekuatan pada suhu tinggi menilai kemampuan bahan untuk bertahan dari tekanan yang ditimbulkan dengan menahan ekspansi termal, termal shock dan beban mekanis.

4. Konduktifitas Panas (*Thermal Conductivity*)

Konduktifitas panas adalah ukuran refraktori mengenai kemampuannya untuk memindahkan panas dari permukaan panas ke permukaan dingin saat terkena suhu tinggi. Uji konduktivitas termal sangat penting karena refraktori seharusnya memiliki konduktifitas panas yang rendah sehingga dapat mempertahankan panas didalam tungku yang akan merambat keluar.

2. 7 Pengujian Refraktori

Pengujian sifat refraktori, dalam banyak kasus dapat menunjukkan kinerja refraktori pada aplikasi aktual. Oleh karena itu, pengujian refraktori yang sesuai untuk memprediksi sifat, sangat mirip dengan aplikasinya, sangatlah penting.

2. 7. 1 Pengujian Massa Jenis (*Bulk Density*)

Pengujian massa jenis merupakan bagian penting dalam material refraktori castable. Bulk density adalah pengukuran tidak langsung konduktifitas panas atau kemampuan menyimpan panas serta sifat lain seperti kekuatan, abrasi, dan permeabilitas gas, sering dikaitkan dengan kepadatan dan porositas refraktori. Secara umum semakin tinggi densitasnya maka semakin rendah porositas sehingga kekuatan tekannya tinggi. Pengujian yang dilakukan pada penelitian ini mengacu pada standar ASM C20 dengan metode air mendidih.

Bulk density dapat rumuskan dengan : $B = \frac{D}{W-S} = \frac{D}{V}$

dimana :

B = Massa jenis / *Bulk density* (gr/cm³)

D = Massa kering / *Dry Weight* (gr)

W = Massa kering permukaan / *Saturated Weight* (gr)

S = Massa terendam / *Suspended Weight* (gr)

V = Volume / *Exterior volume* (cm³)

2. 7. 2 Pengujian Porositas (*Apparent Porosity*)

Secara umum, semakin tinggi porositas maka nilai massa jenis, kuat tekan dan konduktivitas panas semakin rendah. Porositas merupakan ukuran pori-pori refraktori dalam kemampuan untuk melawan penetrasi oleh logam, terak dan fluks. Pengujian porositas pada penelitian ini dilakukan berdasarkan standar ASM C20 dengan metode air mendidih.

Nilai porositas dapat dihitung : $P = \frac{(W-D)}{V} \times 100\%$

dimana :

B = Massa jenis / *Bulk density* (gr/cm³)

D = Massa kering / *Dry Weight* (gr)

W = Massa kering permukaan / *Saturated Weight* (gr)

S = Massa terendam / *Suspended Weight* (gr)

V = Volume / *Exterior volume* (cm³)

2. 7. 3 Pengujian Kuat Tekan (*Cold Crushing Strength*)

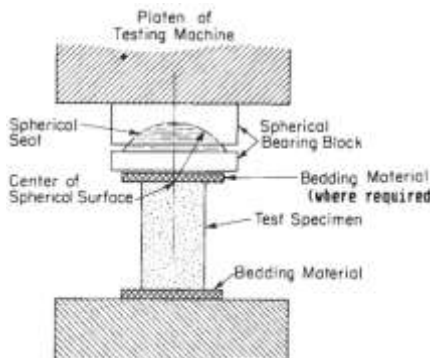
Pengujian *cold crushing strength* dalam material refraktori adalah untuk mengetahui sifat material dalam mengatasi beban atau tekanan. Kekuatan dapat diukur ditemperatur ruang atau variasi temperatur sesuai kegunaan. Untuk kekuatan pada temperatur rendah/kamar tidak dapat digunakan secara langsung untuk memprediksi performance pada saat beroperasi. Pengujian pada temperatur rendah hanya dapat mengindikasikan kemampuan material refraktori terhadap menangani penahanan bentuk dan pengiriman tanpa kerusakan, penahanan abrasi serta menahan dampak dalam aplikasi temperatur yang relatif rendah. Aplikasi terpenting pengetahuan ini terutama untuk tujuan konstruksi di dalam instalasi lining tungku, pengangkutan dan penyimpanan.

Untuk mendapatkan kekuatan yang tinggi, maka harus: [8]

1. Mempunyai zat pengikat yang baik (*good binding agent*)
2. Mempunyai susunan butir-butir yang kompak/padat, terutama jika proporsi ikatannya rendah/kecil.

3. Mempunyai densitas atau kerapatan yang tinggi pada masing-masing butir yang memadu.
4. Bahan yang porositas (berpori) umumnya memiliki kekuatan tekannya rendah.

Pada penelitian ini pengujian kuat tekan mengacu pada standar ASTM C-133, spesimen uji diletakkan pada *testing machine* dan akan diberikan pembebanan yang dinaikan secara bertahap dengan luas yang telah di standarkan hingga hancur atau mengalami deformasi. Spesimen uji untuk pengujian kuat tekan dingin (CCS) berbentuk kubus dengan dimensi (50 mm x 50 mm x 50 mm). Permukaan spesimen yang hendak dilakukan uji kuat tekan sebaiknya memiliki permukaan yang rata atau halus agar pembebanannya merata keseluruh permukaan.



Gambar 2.3 Pengujian Kuat Tekan.

Besarnya gaya maksimum yang diterima dinyatakan dalam rumus : $S = \frac{W}{A}$

dimana:

- S = Cold Crushing Strength (kg/cm²)
- W = Gaya maksimal (kg)
- A = Luas penampang benda uji (cm²)

2. 7. 3 Pengujian Konduktivitas Panas (*Thermal Conductivity*)

Pada dasarnya konduksi adalah perpindahan panas tanpa disertai perpindahan bagian-bagian zat perantaranya, dimana energi panasnya dipindahkan dari satu molekul ke molekul lain dari benda tersebut. Pengujian konduktivitas panas dalam material refraktori adalah untuk mengetahui sifat material dalam menghambat perpindahan panas keluar (sebagai isolator).

Pada penelitian ini pengujian konduktivitas panas dilakukan di Laboraturium Perpindahan Panas Teknik Mesin – ITS menggunakan logam tembaga berbentuk silinder sebagai logam penghantar pada kondisi *steady state*. Nilai yang dicari yaitu konduktivitas panas spesimen didapatkan dari hasil perhitungan dibawah ini :

$$Q_{spesimen} = Q_{tembaga}$$

$$\frac{k_{spesimen} \cdot A_{spesimen} \cdot \Delta T_{spesimen}}{l_{spesimen}} = \frac{k_{tembaga} \cdot A_{tembaga} \cdot \Delta T_{tembaga}}{l_{tembaga}}$$

$$k_{spesimen} = \frac{Q_{tembaga} \cdot l_{spesimen}}{\Delta T_{spesimen} \cdot A_{spesimen}}$$

Dimana :

k = konduktivitas panas (W/m.K)

Q = laju perpindahan panas (W)

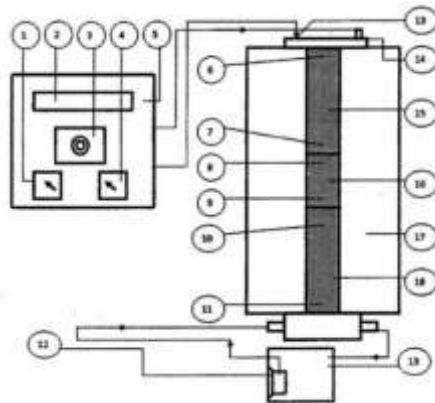
l = panjang jarak thermocouple (m)

A = luas penampang spesimen (m²)

ΔT= perbedaan temperatur (K)

Untuk nilai k tembaga dapat dilihat dari Tabel *Thermophysical Properties of Selected Metallic Solid*.

Berikut merupakan gambar instalasi pengujian konduktivitas panas yang digunakan :



Gambar 2.4 Instalasi peralatan uji konduksi [10]

Keterangan :

- | | |
|---------------------------|-----------------------------|
| 1. Amperemeter | 11. Thermocouple 6 (TC 6) |
| 2. Thermocontrol selector | 12. Pompa |
| 3. Set point adjuster | 13. Thermocontrol referensi |
| 4. Voltmeter | 14. Elemen pemanas |
| 5. Thermocontrol | 15. Logam perantara 1 |
| 6. Thermocouple 1 (TC1) | 16. Spesimen |
| 7. Thermocouple 2 (TC2) | 17. Isolator |
| 8. Thermocouple 3 (TC3) | 18. Logam perantara 2 |
| 9. Thermocouple 4 (TC4) | 19. Penampung air |
| 10. Thermocouple 5 (TC5) | |

2.8 Penelitian Terdahulu

Uraian singkat mengenai penelitian terdahulu yang berkaitan dengan penelitian ini dapat dilihat pada tabel 2.8.

Tabel 2.5 Penelitian terdahulu

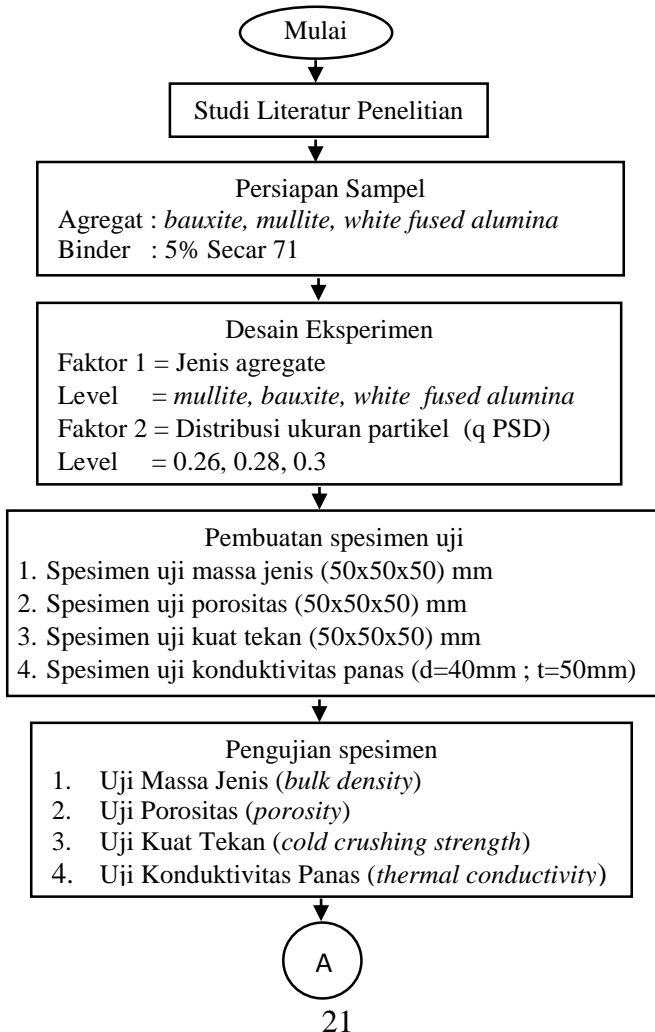
	Penelitian I	Penelitian II	Penelitian III
Pengarang	A. Dombaycı , dkk.	Amvesha Parija	Y. Kutmen Kalpaklı
Tahun	2015	2013	2008
Judul	<i>Effects of Particle Size Distribution on the Refractory Properties and Corrosion Mechanism of Zero-Cement Castables (ZCC)</i>	<i>Low Cement High Alumina Castables: Effect Of Distribution Coefficients</i>	<i>Effects of particle size distribution on the refractory properties and corrosion ultra-low mechanism of cement castables</i>
Variabel	1. Andraesen equation 2. $q = 0.23; 0.24; 0.25; 0.26$	1. Dinger Funk equation 2. $q = 0.21; 0.22; 0.23; 0.24; 0.25; 0.26$	1. Andraesen equation 2. $q = 0.21; 0.23; 0.26; 0.27; 0.29$
Material	Aggregate : Tabular alumina, reactive alumina, and calcined alumina Binder : Alfabond 300	Aggregate : WTA , WFA, reactive alumina Binder : High alumina cement (HAC)	Aggregate : tabular alumina Binder : Secar 71 calcium aluminates cement
Tujuan	the affects of the particle size distribution parameters on the self-flow castable properties were investigated	to study the development of refractory castable system with particle size distribution (PSD) as per well-known Dinger Funk model for continuous distribution and study the developed properties of the castables for their flowability and various characteristics developed at different temperatures.	examines the effects of distribution of particle size-dimensions on refractory properties of alumina based castable refractories in which calcium aluminate cement (Secar-71) is used in low proportions as the hydraulic binder, which affects negatively properties of a refractory at high temperatures owing to its CaO conten
Hasil	$q=0.24$ had a cold crushing strength of 63,8 MPa, porosity of 20,05% and bulk density 3.05 g/cm ³ and self-flow 110%. zero-cement self flow high alumina castable can be produced by the control of particle size distribution of castable.	Water requirement increases with increase in percentage of cement binder due to the property of CaO to absorb water. The bulk density of samples Reactive Alumina is higher than the WTA because require less water resulting in lower porosity thus higher bulk density.	When the particle size distribution module was changed from 0.21 to 0.26; it was found out that refractory properties improved. $q=0.26$, Cold crushing strength of the material prepared with water of 4.32 % rate was 93 MPa, apparent porosity was 16.4% and bulk density was 3.12 g/cm ³ .

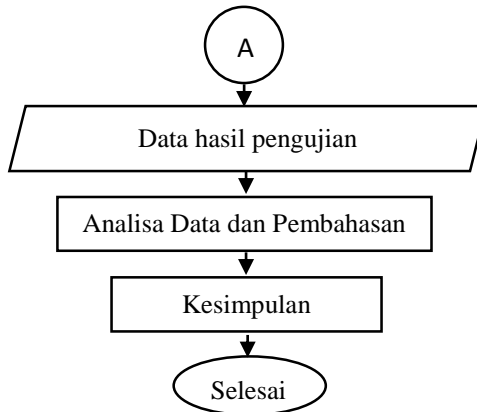
(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)

BAB III METODOLOGI

3.1 Diagram Alir Penelitian

Tahapan observasi yang dilaksanakan pada penelitian ini ditunjukkan pada diagram alir (gambar 3. 1) :





Gambar 3. 1 Diagram alir penelitian

3. 2 Persiapan Sampel

3. 2. 1 Raw Material

Agregat yang dipakai sebagai bahan *castable* pada penelitian ini didapatkan dari PT. Loka Refractories yaitu *mullite*, *bauxite* dan *white fused alumina*. Bahan pengikat (*binder*) yang digunakan adalah Secar-71 dengan komposisi kimia terdiri dari Al_2O_3 70.5 %, SiO_2 0.7%, $\text{Fe}_2\text{O}_3 < 0.3\%$ dan CaO 28%.



Gambar 3. 2 Jenis agregat (a) *mullite* (b) *bauxite* (c) *white fused alumina*

Tabel 3.1 Spesifikasi agregat

Nama Item	Mullite	Bauxite	WFA
Warna	Putih/abu-abu	Abu-abu/krem	Putih kilap
Berat jenis (gr/cm^3)	2.70 - 2.90	3.4 - 3.70	3.30 – 3.70
Komposisi kimia (%)			
• Al_2O_3	68	85	99
• SiO_2	27	9-11	0.02
• Fe_2O_3	0.5	1.8	0.02

Pada penelitian ini komposisi castable yang digunakan sebesar 95% agregat dan 5% binder dari 1,5 kg. Dengan menjaga modulus distribusi pada 0,26, 0,28, 0,3 untuk aplikasi vibrasi maka menghitung prosentase partikel yang dibutuhkan dalam berbagai rentang ukuran menggunakan CPFT dari persamaan Andreasen :

$$CPFT = \left(\frac{d}{D}\right)^q \times 100\%$$
Tabel 3.2 Ukuran partikel dan CPFT untuk $q = 0,26$

Ukuran partikel (mm)	CPFT (%)
5	100
3	87,56
0,5	54,95
0,074	33,44
0	0

Tabel 3.3 Kisaran ukuran dan jumlah partikel untuk $q = 0,26$

Ukuran partikel (mm)	% partikel	Jumlah yg dibutuhkan dalam 1,425 kg (gram)
5 mm - 3mm	12,44	177,2
3 mm - 0,5mm	32,61	464,7
0,5 mm - 0,074 mm	21,51	306,6
< 0,074 mm	33,44	476,5

Tabel 3.4 Ukuran partikel dan CPFT untuk $q = 0,28$

Ukuran partikel (mm)	CPFT (%)
5	100
3	86,67
0,5	52,48
0,074	30,73
0	0

Tabel 3.5 Kisaran ukuran dan jumlah partikel untuk $q = 0,28$

Ukuran partikel (mm)	% partikel	Jumlah yg dibutuhkan dalam 1,425 kg (gram)
5 mm - 3mm	13,33	189,9
3 mm - 0,5mm	34,19	487,2
0,5 mm - 0,074 mm	21,74	309,8
< 0,074 mm	30,74	438,0

Tabel 3.6 Ukuran partikel dan CPFT untuk $q = 0,3$

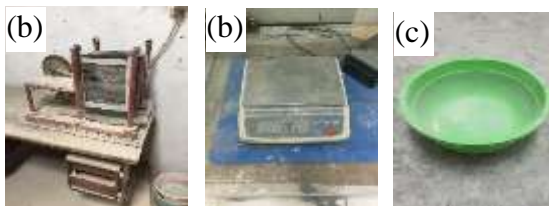
Ukuran partikel (mm)	CPFT (%)
5	100
3	85,79
0,5	50,11
0,074	28,25
0	0

Tabel 3.7 Kisaran ukuran dan jumlah partikel untuk $q = 0,3$

Ukuran partikel (mm)	% partikel	Jumlah yg dibutuhkan dalam 1,425 kg (gram)
5 mm - 3mm	14,21	202,5
3 mm - 0,5mm	35,67	508,3
0,5 mm - 0,074 mm	21,86	311,6
< 0,074 mm	28,25	402,6

3. 2. 2 Penyaringan (*Screening*)

Persiapan peralatan yang digunakan yaitu alat penyaring, neraca elektrik, sendok, dan wadah plastik. Sedangkan bahan yang digunakan refraktori castable yaitu *mullite*, *bauxite*, *brown fused alumina* yang harus dikeringkan terlebih dahulu pada suhu 105°C - 110°C selama ± 2 jam. Kemudian dilakukan penyaringan dengan mesin penyaring untuk mendapatkan gradasi ukuran butiran agregat yang terdiri dari kasar, sedang dan halus.



Gambar 3. 3 peralatan (a) mesin penyaring (b) neraca (c) wadah

3. 2. 3 Pencampuran (*Mixing*)

Proses pencampur bahan baku *castable* dilakukan secara konvensional, terdiri dari gradasi ukuran butiran mineral (agregat), bahan perekat (binder) dan air bersih. Campuran siap digunakan bila sudah homogen. Semua bahan yang sudah dicampur harus segera dicasting dalam waktu 20 menit setelah pencampuran.

3. 2. 4 Pembentukan (*Casting*)

Cetakan untuk proses pembentukan/ casting harus bersih dan tidak berair. Pemadatan castable dioptimalisasikan dengan getaran mekanik atau dengan memukul sisi cetakan untuk mencegah timbulnya gelembung udara karena mengakibatkan terjadinya porositas baik yang di dalam atau permukaan pada hasil casting.

3.3 Desain Eksperimen

Pada penelitian ini perancangan percobaan dilakukan dengan metode faktorial menggunakan *software* Minitab. Hasil pengujian akan dianalisis menggunakan desain eksperimen faktorial yang melibatkan dua faktor atau variabel eksperimen dimana masing-masing faktor memiliki tiga level sehingga dapat dinyatakan 3^2 faktorial desain. Faktor dan level yang dimaksud dalam penelitian ini dapat dilihat pada tabel berikut :

Tabel 3.8 Faktor dan level penelitian

Faktor	Level		
	1	2	3
1. Jenis agregate	mullite	bauxite	WFA
2. Modulus distribusi ukuran agregat (q PSD)	0,26	0,28	0,3

3.4 Pembuatan Spesimen

3.4.1 Proses Pembuatan Spesimen untuk Pengujian Massa Jenis, Porositas dan Kuat Tekan

Proses pembuatan spesimen untuk pengujian massa jenis, porositas dan kuat tekan terdiri dari :

1. Mempersiapkan cetakan untuk pembuatan spesimen uji berat jenis dan kuat tekan. Dimensi cetakan spesimen 50 x 50 x 50 mm sesuai standard ASTM C-133.
2. Membersihkan cetakan dari debu/kotoran kemudian melapisi bagian dalam cetakan dengan pelumas.
3. Menuangkan campuran material ke dalam cetakan.
4. Menggetarkan cetakan yang berisi material guna mengurangi gelembung udara.
5. Meratakan dan merapikan permukaan .
6. Tunggu hingga mengeras kemudian keluarkan spesimen dari cetakan.

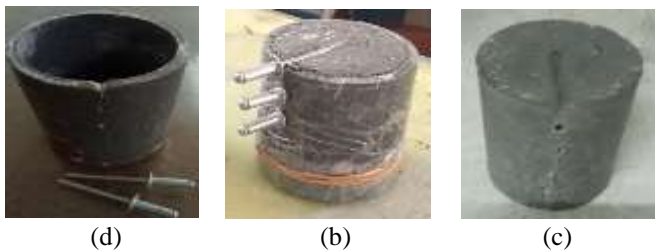


Gambar 3. 4 Perlengkapan pembuatan spesimen massa jenis, porositas dan kuat tekan,
a. cetakan b. campuran masuk cetakan c. spesimen

3. 4. 2 Proses Pembuatan Spesimen untuk Pengujian Konduktivitas Panas

Proses pembuatan spesimen untuk pengujian berat jenis dan kuat tekan terdiri dari :

1. Mempersiapkan cetakan untuk pembuatan spesimen uji konduktivitas panas dengan dimensi berikut diameter 40 mm dan tinggi 50 mm.
2. Membersihkan cetakan dari debu/kotoran kemudian melapisi bagian dalam cetakan dengan pelumas.
3. Menuangkan campuran material ke dalam cetakan.
4. Menggetarkan cetakan yang berisi material guna mengurangi gelembung udara.
5. Masukan pin/rivet pada lubang cetakan yang tersedia.
6. Tunggu hingga mengeras kemudian keluarkan spesimen dari cetakan.



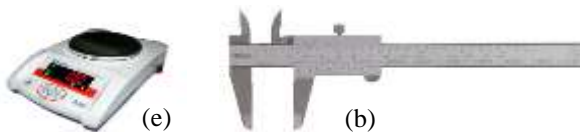
Gambar 3. 5 Perlengkapan pembuatan spesimen konduktivitas panas, a. cetakan ; b. material masuk cetakan ; c. spesimen

3.5 Pengujian

Pada penelitian ini dilakukan empat pengujian untuk mendapatkan data-data yang diperlukan yaitu pengujian massa jenis, pengujian temperatur kerja maksimum, pengujian kuat tekan dan pengujian perambatan panas. Pengujian tersebut dilakukan di Laboratorium Metalurgi Jurusan Teknik Mesin ITS untuk pengujian massa jenis, porositas dan kuat tekan serta pengujian konduktivitas panas di Laboratorium Perpindahan Panas Jurusan Teknik Mesin ITS.

3.5.1 Pengujian Massa Jenis (*Bulk Density*) dan Porositas (*Apparent Porosity*)

Perlengkapan yang digunakan pada proses pengujian massa jenis dan porositas yaitu neraca elektrik dengan hook dibagian bawah merek Sayaki tipe SS-A2000 dengan ketelitian 0.01 gram serta jangka sorong merek Mitutoyo dengan ketelitian 0.01 mm. Metode pengujian massa jenis yang dilakukan mengacu pada standar ASTM C-20.



Gambar 3. 6 Perlengkapan pengujian massa jenis dan porositas,
a. neraca elektrik ; b. jangka sorong



Gambar 3. 7 Ilustrasi pengujian massa jenis dan porositas,
a. ukur massa kering, D ; b. benda uji dipanaskan ; c. ukur masa terendam, S

Prosedur pengujian massa jenis :

1. Mempersiapkan benda uji.
2. Keringkan benda uji di lemari pengering/oven dengan suhu 105-110°C, selama ± 24 jam.
3. Timbang benda uji dengan neraca elektrik. Berat yang didapat adalah *Dry Weight, D* dengan ketelitian 0,1 gram.
4. Rendam benda uji dalam air dan dipanaskan selama 2 jam hingga mendidih. Tidak boleh ada kontak langsung antara benda uji dengan bagian bawah alat pemanas.
5. Dinginkan benda uji yang masih dalam air pada temperatur kamar selama 13 jam.
6. Timbang benda uji dalam keadaan terendam dengan neraca pegas. Berat yang didapat merupakan *Suspended Weight, S* dengan ketelitian 0,1 gram
7. Keluarkan benda uji dari dalam air lalu basuh dengan kain untuk menghilangkan air di permukaan benda.
8. Timbang benda uji dengan neraca pegas. Berat yang didapat merupakan *Saturated Weight, W* dengan ketelitian 0,1 gram.
9. Hitung exterior volume bahan dengan rumus : $V = W - S$
10. Hitung bulk density bahan dengan rumus : $B = \frac{D}{V}$
11. Hitung apparent porosity, P dengan rumus :

$$P (\%) = \left[\frac{(W-D)}{V} \right] \times 100$$

3. 5. 2 Pengujian Kuat Tekan (*Cold Crushing Strength*)

Metode yang digunakan pada pengujian kuat tekan mengacu pada standar ASTM C133-97 menggunakan mesin uji merk *Wolpert* di Laboratorium Metallurgy Jurusan Teknik Mesin ITS Surabaya.



Gambar 3. 8 Alat uji kuat tekan

Prosedur pengujian kuat tekan :

1. Mempersiapkan benda uji kemudian ukur dimensi untuk menghitung luas permukaan benda uji.
2. Tempatkan benda uji tepat pada posisi tengah bidang holder alat uji.
3. Jalankan mesin sampai benda uji hancur
4. Mendapatkan nilai kekuatan tekan.

3. 5. 3 Pengujian Konduktivitas Panas

Mesin uji yang digunakan adalah mesin uji konduktivitas panas rakitan dengan metode pengujian mengikuti standar operasional prosedur (SOP) di Laboratorium Perpindahan Panas Jurusan Teknik Mesin ITS Surabaya.



Gambar 3. 8 Alat uji konduktivitas panas

Prosedur pengujian :

1. Mempersiapkan benda uji (gambar 3.4 c).
2. Pasang *thermocouple* pada spesimen.
3. Atur tegangan *voltage* regulator pada nilai 220 V.
4. Pompa dipastikan dapat mensirkulasikan air pendingin dengan baik.
5. *Thermocontrol* dinyalakan dengan menekan saklar tegangan pada posisi ON. Set point *thermocontrol* diatur pada nilai 100°C.
6. Data siap diambil dengan waktu tunggu minimum 5 menit setelah prosedur 4. Data yang diambil terdapat pada lembar data praktikum konduksi. Pengambilan data arus dapat dilihat pada amperemeter, data tegangan dapat dilihat pada voltmeter dengan mengatur set point *thermoselector*.
7. Mendapatkan nilai konduktifitas panas.

(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)

BAB IV

DATA DAN ANALISA HASIL PENELITIAN

Pengujian dan pengumpulan data dilakukan pada spesimen castable. Data yang didapatkan dari pengujian yaitu nilai *bulk density*, porositas, kekuatan tekan, dan konduktivitas panas.

4.1 Pengujian Massa Jenis (*Bulk Density*) dan Porositas (*Apparent Porosity*)

Dilakukan pengujian massa jenis (*bulk density*) dan porositas (*apparent porosity*) masing-masing dilakukan pada delapan belas spesimen menggunakan standart ASTM C20-00.



Gambar 4.1 Spesimen uji massa jenis, porositas dan kuat tekan

4.1.1 Data Hasil Pengujian Massa Jenis (*Bulk Density*) dan Porositas (*Porosity*)

Hasil pengujian massa jenis (*bulk density*) dan porositas (*apparent porosity*) dituangkan pada tabel 4. 1

Tabel 4.1 Data Hasil Pengujian Massa Jenis (*Bulk Density*) dan Porositas (*Apparent Porosity*)

Agregat	q PSD	Kode	Massa Kering D (gr)	Massa dalam air S (gr)	Massa kering permukaan W (gr)	V (cm ³)	BD (gr/cm ³)	P (%)
Mullite	0,26	M1 1/2	274,14	181,45	308,49	127,04	2,16	27%
		M1 2/2	278,28	186,33	313,83	127,5	2,18	28%
	0,28	M2 1/2	284,73	189,88	318,55	128,64	2,2	26%
		M2 2/2	279,11	185,58	311,82	126,24	2,21	26%
	0,3	M3 1/2	283,82	190,63	315,44	124,81	2,27	25%
		M3 2/2	276,75	182,96	305,86	122,9	2,25	24%
Bauxite	0,26	B1 1/2	330,15	230,94	361,82	130,88	2,52	24%
		B1 2/2	330,26	228,79	360,69	131,9	2,50	23%
	0,28	B2 1/2	328,7	230,16	357,3	127,14	2,59	22%
		B2 2/2	327,16	228,88	355,15	126,27	2,59	22%
	0,3	B3 1/2	316,79	222,31	341,29	118,98	2,66	21%
		B3 2/2	313,76	219,5	339,17	119,67	2,62	21%
WFA	0,26	W1 1/2	366,73	260,35	398,37	138,02	2,66	23%
		W1 2/2	365,53	260,15	395,9	135,75	2,69	22%
	0,28	W2 1/2	350,51	253,96	377,51	123,55	2,84	22%
		W2 2/2	350,31	260,16	375,21	122,95	2,85	20%
	0,3	W3 1/2	354,45	255,61	377,78	122,17	2,90	19%
		W3 2/2	352,16	256,15	376,12	119,97	2,94	20%

Contoh perhitungan dari hasil pengujian massa jenis (*bulk density*) dan porositas (*apparent porosity*) pada salah satu data spesimen yaitu Bauxite 0,26 (B1 1/2) sebagai berikut :

Data yang diketahui :

Massa kering (D) : 329,85 gram
 Berat dalam air (S) : 232,57 gram
 Berat kering permukaan (W) : 361,38 gram

Nilai yang dicari yaitu massa jenis (*bulk density*) dan porositas (*porosity*), merupakan hasil perhitungan dibawah ini :

$$\begin{aligned}
 \text{Exterior Volume (V)} &= W - S \\
 &= 361,38 - 232,57 \\
 &= 128,81 \text{ gr}
 \end{aligned}$$

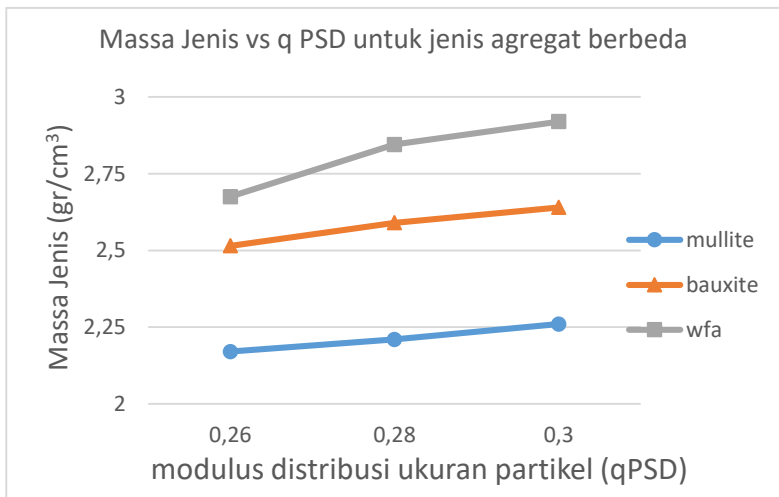
*asumsi 1 cm³ air = 1 gram (berdasarkan ASTM C20-00)

$$\begin{aligned}\text{Bulk Density (BD)} &= \frac{D}{V} \\ &= \frac{329,85}{128,81} = 2,56 \text{ gr/cm}^3\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Porositas (P)} &= \frac{(W-D)}{V} \times 100\% \\ &= \frac{(361,38-329,85)}{128,81} \times 100\% \\ &= 24\%\end{aligned}$$

4. 1. 2 Analisa dan Pembahasan Pengujian Massa Jenis (*Bulk Density*)

Dari data hasil pengujian dibuat grafik massa jenis spesimen yang dapat dilihat pada gambar 4.2



Gambar 4.2 Grafik hasil pengujian massa jenis (*bulk density*) versus modulus distribusi ukuran partikel (qPSD) untuk jenis agregat berbeda

Plot rata-rata hasil pengujian massa jenis (bulk density) versus modulus distribusi ukuran partikel (qPSD) ditunjukkan pada grafik diatas, dapat diketahui bahwa grafik memiliki trendline naik dari $q = 0.26$ hingga 0.3 untuk ketiga jenis agregat. Hal tersebut dibuktikan dengan nilai massa jenis pada $q=0.3$ WFA memiliki tertinggi sebesar 2.92 gr/cm^3 , bauxite 2.64 gr/cm^3 dan mullite terendah yaitu 2.26 gr/cm^3 . Untuk $q=0.28$ WFA juga memiliki nilai massa jenis tertinggi sebesar 2.85 gr/cm^3 , bauxite 2.59 gr/cm^3 dan mullite terendah yaitu 2.21 gr/cm^3 . Sedangkan untuk $q=0.26$ WFA juga memiliki nilai massa jenis tertinggi sebesar 2.67 gr/cm^3 , bauxite 2.51 gr/cm^3 dan mullite terendah yaitu 2.17 gr/cm^3 .

General Factorial Regression: BD versus agregate; q PSD					
Factor Information					
Factor	Levels	Values			
agregate	3	mullite; bauxite; wfa			
q PSD	3	0,26; 0,28; 0,3			
Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	8	1,19270	0,149087	487,92	0,000
Linear	4	1,17753	0,294383	963,44	0,000
agregate	2	1,10423	0,552117	1806,93	0,000
q PSD	2	0,07330	0,036650	119,95	0,000
2-Way Interactions	4	0,01517	0,003792	12,41	0,001
agregate*q PSD	4	0,01517	0,003792	12,41	0,001
Error	9	0,00275	0,000306		
Total	17	1,19545			

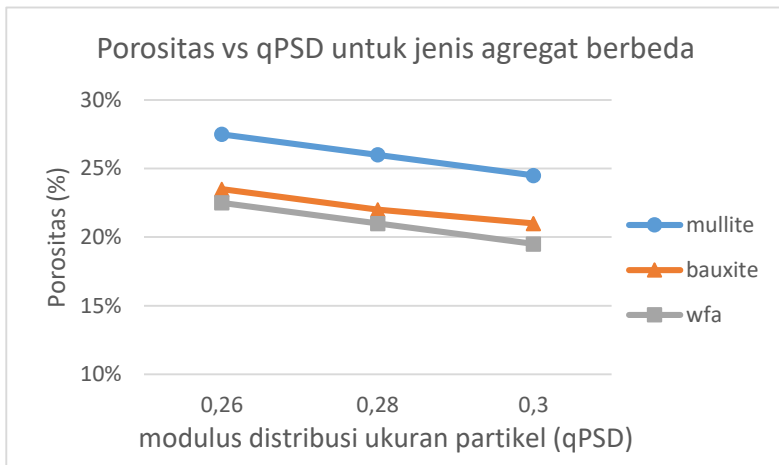
Pada penelitian ini dilakukan pengujian menggunakan metode statistik 3^2 faktorial dari Minitab untuk mengetahui apakah jenis agregat dan modulus distribusi ukuran butiran berpengaruh signifikan terhadap bulk density refraktori castable Al_2O_3 - SiO_2 , dengan tingkat kepercayaan atau *Convident Level* (CL) sebesar 95%.

Dari hasil pengujian menggunakan metode 3^2 faktorial didapatkan nilai tingkat signifikan (*P-value*) : 0% untuk jenis agregat dan modulus distribusi ukuran butiran(qPSD). Nilai tingkat signifikan (*P-value*) untuk jenis agregat dan modulus distribusi ukuran butiran (qPSD) < 5%, sehingga dapat disimpulkan bahwa jenis agregat dan modulus distribusi ukuran butiran (qPSD)

berpengaruh secara signifikan terhadap bulk density refraktori castable Al_2O_3 - SiO_2 .

4.1.3 Analisa dan Pembahasan Pengujian Porositas (*Apparent Porosity*)

Dari data hasil pengujian dibuat grafik porositas spesimen yang dapat dilihat pada gambar 4.3



Gambar 4.3 Grafik hasil pengujian porositas (*apparent porosity*) versus modulus distribusi ukuran partikel (qPSD) untuk jenis agregat berbeda

Plot rata-rata hasil pengujian porositas (*porosity*) versus modulus distribusi ukuran partikel (qPSD) ditunjukkan pada grafik diatas, dapat diketahui bahwa grafik memiliki trendline turun dari $q = 0.26$ hingga 0.3 untuk ketiga jenis agregat. Pada $q=0.3$ WFA memiliki nilai porositas terendah yaitu 20% , bauxite 21% dan mullite tertinggi sebesar 25% . Untuk $q=0.28$ WFA juga memiliki nilai porositas terendah yaitu 21% , bauxite 22% dan mullite tertinggi yaitu 26% . Sedangkan untuk $q=0.26$ WFA juga memiliki nilai porositas terendah yaitu 23% , bauxite 24% dan mullite

tertinggi yaitu 28%. Hal ini sesuai dengan teori dimana semakin tinggi nilai masa jenis maka semakin rendah pula nilai porositasnya [3].

Pada penelitian ini dilakukan pengujian menggunakan metode statistik 3^2 faktorial dari Minitab untuk mengetahui apakah jenis agregat dan modulus distribusi ukuran butiran berpengaruh signifikan terhadap porositas refraktori castable Al_2O_3 - SiO_2 , dengan tingkat kepercayaan atau *Convident Level* (CL) sebesar 95%.

General Factorial Regression: P versus aggregate; q PSD

Factor Information

Factor	Levels	Values
aggregate	3	mullite; bauxite; wfa
q PSD	3	0,26; 0,28; 0,3

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	8	0,010644	0,001331	26,61	0,000
Linear	4	0,010622	0,002656	53,11	0,000
aggregate	2	0,008211	0,004106	82,11	0,000
q PSD	2	0,002411	0,001206	24,11	0,000
2-Way Interactions	4	0,000022	0,000006	0,11	0,975
aggregate*q PSD	4	0,000022	0,000006	0,11	0,975
Error	9	0,000450	0,000050		
Total	17	0,011094			

Dari hasil pengujian menggunakan metode 3^2 faktorial didapatkan nilai tingkat signifikan (*P-value*) : 0% untuk jenis agregat dan modulus distribusi ukuran butiran(qPSD). Nilai tingkat signifikan (*P-value*) untuk jenis agregat < 5%, sehingga dapat disimpulkan bahwa jenis agregat berpengaruh secara signifikan terhadap porositas refraktori castable Al_2O_3 - SiO_2 . Sedangkan nilai tingkat signifikan (*P-value*) untuk modulus distribusi ukuran butiran (qPSD) < 5%, sehingga dapat disimpulkan bahwa modulus distribusi ukuran butiran (qPSD) berpengaruh secara signifikan terhadap porositas refraktori castable Al_2O_3 - SiO_2 .

4.2 Pengujian Kuat Tekan (*Cold Crushing Strength*)

Dilakukan pengujian kuat tekan (*bulk density*) dilakukan pada delapan belas spesimen menggunakan standard ASTM C113. Spesimen uji kuat tekan berbentuk kubus sama seperti spesimen bulk density yang dapat dilihat pada gambar 4.1

4.2.1 Data Hasil Pengujian Kuat Tekan (*Cold Crushing Strength*)

Hasil pengujian kuat tekan (*Cold Crushing Strength*) dituangkan pada tabel 4. 2

Tabel 4. 2 Data Hasil Pengujian Kuat Tekan

Spesimen	Kode	Beban Maksimum, W (kgf)	Luas Penampang A (cm ²)	Cold Crushing Strength S (kgf/cm ²)
Mullite	0,26	M1 1/2	1130	28,44
		M1 2/2	1150	26,14
	0,28	M2 1/2	1290	25,56
		M2 2/2	1220	26,15
	0,3	M3 1/2	2190	26,47
		M3 2/2	1990	25,88
Bauxite	0,26	B1 1/2	3510	25,17
		B1 2/2	3510	26,89
	0,28	B2 1/2	3580	25,84
		B2 2/2	3660	25,17
	0,3	B3 1/2	3930	25,13
		B3 2/2	3750	25,38
WFA	0,26	W1 1/2	4220	25,55
		W1 2/2	2850	25,03
	0,28	W2 1/2	4550	25,46
		W2 2/2	3540	25,49
	0,3	W3 1/2	5340	26,24
		W3 2/2	4890	25,75

Contoh perhitungan dari hasil pengujian *cold crushing strength* dari salah satu data spesimen yaitu Bauxite 0,26 (B1 1/2) sebagai berikut :

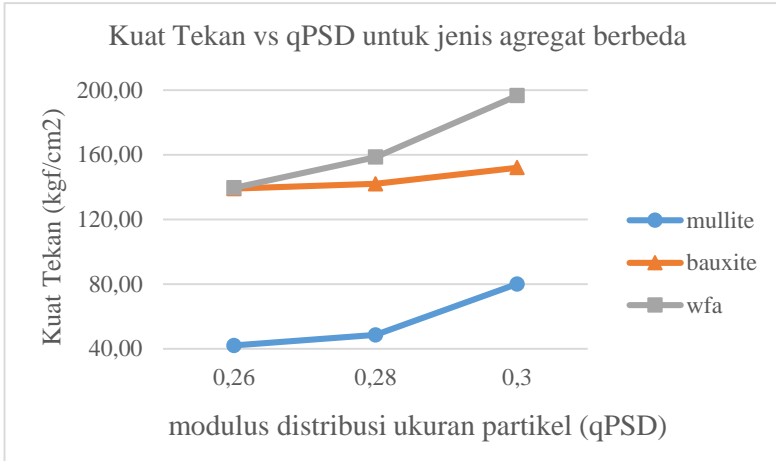
Data yang diketahui : Beban Maksimum (W) : 3510 kgf
Luas Penampang (A) : 25,17 cm²

Nilai yang dicari yaitu kuat tekan merupakan hasil perhitungan dibawah ini :

$$\begin{aligned}
 \text{Cold Crushing Strength (S)} &= \frac{W}{A} \\
 &= \frac{3510}{25,17} = 139 \text{ kgf/cm}^2
 \end{aligned}$$

4. 2. 2 Analisa dan Pembahasan Pengujian Kuat Tekan (*Cold Crushing Strength*)

Dari data hasil pengujian dibuat grafik kuat tekan spesimen yang dapat dilihat pada gambar 4.6



Gambar 4.4 Grafik hasil pengujian kuat tekan versus modulus distribusi ukuran partikel (qPSD) untuk jenis agregat berbeda

Plot rata-rata hasil pengujian kuat tekan versus modulus distribusi ukuran partikel (qPSD) untuk ketiga jenis agregat memiliki trendline naik dari $q=0.26$ hingga $q=0.3$. Pada $q=0.3$ WFA memiliki nilai kuat tekan tertinggi sebesar 196.50 kgf/cm^2 , bauxite 152 kgf/cm^2 dan mullite terendah yaitu 80 kgf/cm^2 . Untuk $q=0.28$ WFA juga memiliki nilai kuat tekan tertinggi yaitu 158.50 kgf/cm^2 , bauxite 142 kgf/cm^2 dan mullite terendah yaitu 48.50 kgf/cm^2 . Sedangkan pada $q=0.26$ WFA juga memiliki nilai kuat tekan tertinggi yaitu 139.50 kgf/cm^2 , bauxite 134.50 kgf/cm^2 dan mullite terendah yaitu 42 kgf/cm^2 . Hal ini sesuai dengan teori dimana semakin tinggi nilai masa jenis maka semakin rendah pula nilai porositasnya sehingga nilai kuat tekannya pun tinggi [3].

Pada penelitian ini dilakukan pengujian menggunakan metode statistik 3^2 faktorial dari Minitab untuk mengetahui apakah jenis agregat dan modulus distribusi ukuran butiran berpengaruh signifikan terhadap kuat tekan refraktori castable Al_2O_3 - SiO_2 , dengan tingkat kepercayaan atau *Convident Level* (CL) sebesar 95%.

General Factorial Regression: CCS versus agregate; q PSD

Factor Information

Factor	Levels	Values
agregate	3	mullite; bauxite; wfa
q PSD	3	0,26; 0,28; 0,3

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	8	44055	5506,9	21,27	0,000
Linear	4	43019	10754,7	41,54	0,000
agregate	2	38961	19480,7	75,25	0,000
q PSD	2	4057	2028,7	7,84	0,011
2-Way interactions	4	1036	259,1	1,00	0,456
agregate*q PSD	4	1036	259,1	1,00	0,456
Error	9	2330	258,9		
Total	17	46385			

Dari hasil pengujian menggunakan metode 3^2 faktorial didapatkan nilai tingkat signifikan (*P-value*) : 0% untuk jenis agregat dan 1,1 % untuk modulus distribusi ukuran butiran (qPSD). Nilai tingkat signifikan (*P-value*) untuk jenis agregat dan modulus distribusi ukuran butiran (qPSD) < 5%, sehingga dapat disimpulkan bahwa jenis agregat berpengaruh secara signifikan terhadap kuat tekan refraktori castable Al_2O_3 - SiO_2 .

4.3 Pengujian Konduktivitas Panas (*Thermal Conductivity*)

Dilakukan pengujian konduktivitas panas (*thermal conductivity*) pada delapan belas spesimen dengan setting temperatur 100°C, arus lisrtik 1,4 Ampere dan tegangan 210 Volt. Spesimen uji konduktivitas panas (*thermal conductivity*) berbentuk silinder seperti ditunjukkan pada gambar 4.5.



Gambar 4.5 Spesimen uji konduktivitas panas

4. 3. 1 Data Hasil Pengujian Konduktivitas Panas (*Thermal Conductivity*)

Tabel 4.3 Hasil pengujian konduktivitas panas

Agregat	q	Kode	T1	T2	T3	T4	T5	T6	K
Mullite	0,26	M1 1/2	104,5	102,8	94,9	70,8	38,3	37,4	2,578
		M1 2/2	104,1	102,4	94,5	70,2	37,8	36,7	2,557
	0,28	M2 1/2	99,3	98,2	89,1	74,4	34,4	33,9	2,732
		M2 2/2	99,4	98,2	89,4	74,2	34,4	33,8	2,882
	0,3	M3 1/2	101,3	100,3	91,9	81	31,4	30,9	3,351
		M3 2/2	101,4	100,3	92,3	81,2	37	36	3,620
Bauxite	0,26	B1 1/2	103,7	102,5	92,1	76,3	36,4	35,9	2,776
		B1 2/2	103,8	102,6	92,2	76,6	36,5	35,9	2,811
	0,28	B2 1/2	102,8	101,6	83,5	70,2	36,1	35,5	3,297
		B2 2/2	102,9	101,7	83,5	70,3	36,2	35,5	3,322
	0,3	B3 1/2	103,2	102,2	80,2	71,2	36,1	35,6	4,060
		B3 2/2	103,3	102,3	80,3	71,3	36,1	35,5	4,060
WFA	0,26	W1 1/2	101,7	100,3	82	66,1	36,9	36,2	3,216
		W1 2/2	101,9	100,5	82,1	66,5	37,1	36,3	3,278
	0,28	W2 1/2	103,9	102,4	84,7	69,5	37,3	36,5	3,606
		W2 2/2	103,9	102,4	84,8	69,6	37,3	36,6	3,606
	0,3	W3 1/2	101,6	100,1	79,2	67,2	36,7	35,9	4,566
		W3 2/2	102	100,5	79,3	67,3	36,8	36	4,566

Contoh perhitungan dari hasil pengujian konduktivitas panas dari salah satu data spesimen yaitu Bauxite 0,26 (B1 1/2) sebagai berikut :

Data yang diketahui :

logam penghantar :

$$\text{diameter} = 0,04 \text{ m} ; A = 0,00126 \text{ m}^2$$

$$\Delta T = T_1 - T_2 = 1,2 \text{ K}$$

$$l = 0,1 \text{ m}$$

$$k = 410,61 \text{ W/m.K}$$

spesimen :

$$\text{diameter} = 0,04 \text{ m} ; A = 0,00126 \text{ m}^2$$

$$\Delta T = T_3 - T_4 = 15,8 \text{ K}$$

$$l = 0,01 \text{ m}$$

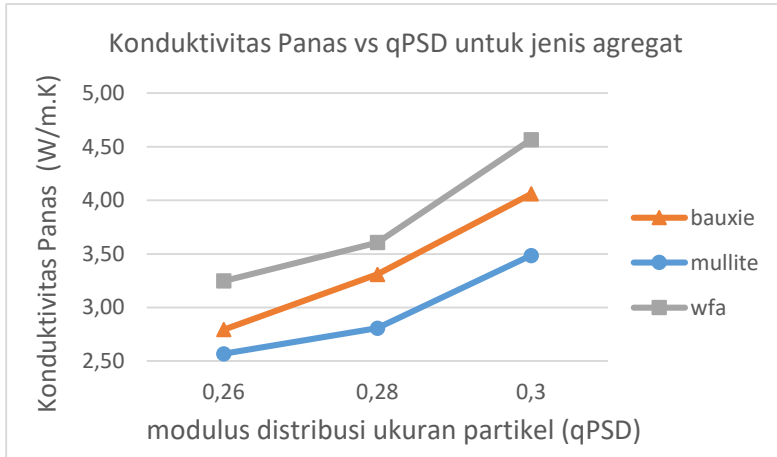
Nilai yang dicari yaitu konduktivitas panas spesimen didapatkan dari hasil perhitungan dibawah ini :

$$\begin{aligned} \frac{Q_{\text{spesimen}}}{\frac{k_{\text{spesimen}} \cdot A_{\text{spesimen}} \cdot \Delta T_{\text{spesimen}}}{l_{\text{spesimen}}}} &= \frac{Q_{\text{tembaga}}}{\frac{k_{\text{tembaga}} \cdot A_{\text{tembaga}} \cdot \Delta T_{\text{tembaga}}}{l_{\text{tembaga}}}} \\ k_{\text{spesimen}} &= \frac{Q_{\text{tembaga}} \cdot l_{\text{spesimen}}}{\Delta T_{\text{spesimen}} \cdot A_{\text{spesimen}}} \\ k_{\text{spesimen}} &= \left(\frac{6,19 \text{ W} \cdot 0,01 \text{ m}}{15,8 \text{ K} \cdot 0,00126 \text{ m}^2} \right) \times 0,89 = 2,775 \end{aligned}$$

*0,89 merupakan faktor koreksi

4.3.2 Analisa dan Pembahasan Pengujian Konduktivitas Panas (*Thermal Conductivity*)

Dari data hasil pengujian dibuat grafik konduktivitas panas spesimen yang dapat dilihat pada gambar 4.9



Gambar 4.6 Grafik hasil pengujian konduktivitas versus modulus distribusi ukuran partikel (qPSD) untuk jenis agregat berbeda

Plot rata-rata hasil pengujian konduktivitas panas versus modulus distribusi ukuran partikel (qPSD) untuk ketiga jenis agregat menunjukkan trendline naik dari $q=0.26$ hingga $q=0.3$. Pada $q=0.3$ WFA memiliki nilai konduktivitas panas tertinggi sebesar 4.57 W/m.K, bauxite 4.06 W/m.K dan mullite terendah yaitu 3.49 W/m.K. Untuk $q=0.28$ WFA juga memiliki konduktivitas panas tertinggi yaitu 3.61 W/m.K, bauxite 3.31 W/m.K dan mullite terendah yaitu 2.81 W/m.K. Sedangkan pada $q=0.26$ WFA juga memiliki konduktivitas panas tertinggi yaitu 3.25 W/m.K, bauxite 2.79 W/m.K dan mullite terendah yaitu 2.57 W/m.K. Hal ini sesuai teori karena secara keseluruhan WFA memiliki nilai konduktivitas panas tertinggi dan mullite terendah karena dipengaruhi oleh porositas.

Pada penelitian ini dilakukan pengujian menggunakan metode statistik 3^2 faktorial dari Minitab untuk mengetahui apakah jenis agregat dan modulus distribusi ukuran butiran berpengaruh signifikan terhadap konduktivitas panas refraktori castable Al_2O_3 -

General Factorial Regression: TC versus agregate; q PSD					
Factor Information					
Factor	Levels	Values			
agregate	3	mullite; bauxite; wfa			
q PSD	3	0,26; 0,28; 0,3			
Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	8	6,57293	0,82162	146,41	0,000
Linear	4	6,45559	1,61390	287,58	0,000
agregate	2	2,18437	1,09219	194,62	0,000
q PSD	2	4,27121	2,13561	380,55	0,000
2-Way Interactions	4	0,11735	0,02934	5,23	0,019
agregate*q PSD	4	0,11735	0,02934	5,23	0,019
Error	9	0,05051	0,00561		
Total	17	6,62344			

SiO_2 , dengan tingkat kepercayaan atau *Convident Level* (CL) sebesar 95%.

Dari hasil pengujian menggunakan metode 3^2 faktorial didapatkan nilai tingkat signifikan (*P-value*) : 0% untuk jenis agregat dan modulus distribusi ukuran butiran (qPSD). Nilai tingkat signifikan (*P-value*) untuk jenis agregat dan modulus distribusi ukuran butiran (qPSD) < 5%, sehingga dapat disimpulkan bahwa jenis agregat berpengaruh secara signifikan terhadap konduktivitas panas refraktori castable Al_2O_3 - SiO_2 .

(Halaman Ini Sengaja Dikosongkan)

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang didapatkan dari penelitian setelah proses pengambilan dan analisa data adalah :

1. Pengaruh jenis agregat terhadap sifat fisik dan thermal refraktori castable $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$:
 - a. Nilai massa jenis (*bulk density*) WFA memiliki nilai bulk density terbesar sedangkan mullite terkecil.
 - b. Nilai porositas (*apparent porosity*) WFA memiliki nilai porositas terkecil sedangkan mullite terbesar.
 - c. Nilai kuat tekan (*cold crushing strength*) WFA memiliki nilai kuat tekan terbesar sedangkan mullite terkecil.
 - d. Nilai konduktivitas panas (*thermal conductivity*) WFA terbesar sedangkan mullite terkecil karena dipengaruhi oleh nilai porositas.
2. Pengaruh modulus distribusi ukuran partikel (qPSD) terhadap sifat fisik dan thermal refraktori castable $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$:
 - a. Nilai massa jenis (*bulk density*) semakin meningkat dengan seiring bertambah besar nilai modulus distribusi ukuran partikel (qPSD).
 - b. Nilai porositas (*apparent porosity*) menurun seiring bertambah besar nilai modulus distribusi ukuran partikel (qPSD).
 - c. Nilai kuat tekan (*cold crushing strength*) meningkat seiring bertambah besar nilai modulus distribusi ukuran partikel (qPSD).
 - d. Nilai konduktivitas panas (*thermal conductivity*) meningkat seiring bertambah besar nilai modulus distribusi ukuran partikel (qPSD).

5.2 Saran

1. Penelitian refraktori castable dapat dikembangkan dengan tipe yang lain.
2. Pada penelitian selanjutnya dapat dilakukan variasi temperatur pembakaran untuk melihat pengaruhnya terhadap nilai kuat tekan.
3. Pada penelitian selanjutnya dapat dilengkapi pengujian yang dilakukan seperti komposisi kimia, kuat lentur ketahanan abrasi, ketahanan korosi, dan thermal ekspansi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Annual Book of ASTM Volume 15.01 Refractories, Activated Carbon; Advanced Ceramics. USA : ASM International
- [2] Prabir Basu. 2015. "*Circulating Fluidized Bed Boilers Design, Operation, and Maintenance*". Springer Cham Heidelberg New York Dordrecht London.
- [3] Charles A. Schacht. 2004. "*Refractories Handbook*". Schacht Consulting Services Pittsburgh, Pennsylvania, U.S.A
- [4] Harbison Walker. 1998. "*Modern Refractory Practice*". Harbison Walker Refractory Company.
- [5] Hancock, J.D. 1998. "*Refractories for Industrial Users*". Cartworth Industries, Netherton, GB.
- [6] Subrata Banerjee. 1998, "*Monolithic Refractories*". World Scientific Publishing, United States of America
- [7] Achmad Basari. *Pengaruh Paduan Abu Vulkanik dan Tanah Liat Terhadap Sifat Abrasif dan Kuat Tekan Dingin Sebagai Bahan Refraktori*
- [8] Ritongga, Andriansyah, Nugroho, Sri, dan Umardani, Yusuf. 2011. "*Karakterisasi Material Refraktori yang Digunakan pada Lining Tungku Industri Peleburan Baja PT Suyuti Sido Maju Cepur Klaten*". Semarang. Undergraduate thesis Mechanical Engineering Departement of Diponegoro University.

- [9] Efendy, Hadi, 2008, "*Studi Antioksidasi Refraktori Monolitik dengan Bahan Pengikat Tar Resin*", Disertasi S3 Institut Teknologi Bandung.
- [10] Modul Praktikum Perpan Konduktifitas Panas Departemen Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember
- [11] Meena Seema N *Effects of Particle Size Distribution on The Properties of Alumina Refractories*.
- [12] A. Dombaycı, dkk.2015, *Effects of Particle Size Distribution on the Refractory Properties and Corrosion Mechanism of Zero-Cement Castables (ZCC)*. Turkey. Istanbul Technical University.
- [13] Anwesha Parija. 2011. *Low Cement High Alumina Castables: Effect Of Distribution Coefficients*. India. National Institute of Technology Rourkela.
- [14] Y. Kutmen Kalpaklı. 2008. *Effects of particle size distribution on the refractory properties and corrosion ultra-low mechanism of cement castables*. Turkey. Department of Chemical Engineering, Yildiz Technical University.
- [15] Venkatesh Pilli. 2015. *Study on the alumina - silicon carbide - carbon based trough castable*. Department of Ceramic Engineering National Institute of Technology, Rourkela.

LAMPIRAN

Lampiran 1 - Lembar hasil pengujian kuat tekan

TENSION TEST REPORT

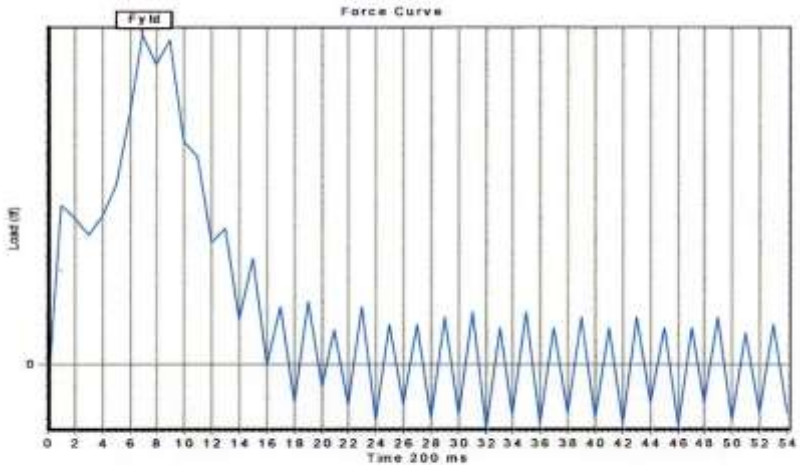


LABORATORIUM METALURGI

JURUSAN TEKNIK MESIN - FTI - INSTITUT TEKNOLOGI 10 NOPEMBER
SURABAYA - INDONESIA

DATE : 21-December-2017
SAMPLE NUMBER : M1 1/2
SPESIFICATION : SNI
SAMPLE TYPE : SQUARE
CUSTOMER : TITIS

SIZE (mm) : 550.95 X 50.84
AREA (mm²) : 28010.3
OPERATOR : mantri
TIME : 14:23



Fmax (tf)	: 1.08	Tensile Strength (kgf/mm ²)	: 0.40
Fyield (tf)	: 1.08	Yield Strength (kgf/mm ²)	: 0.04
Ratio	: 1.00	Elongation (%)	: 0.00
Notes	:		

TENSION TEST REPORT

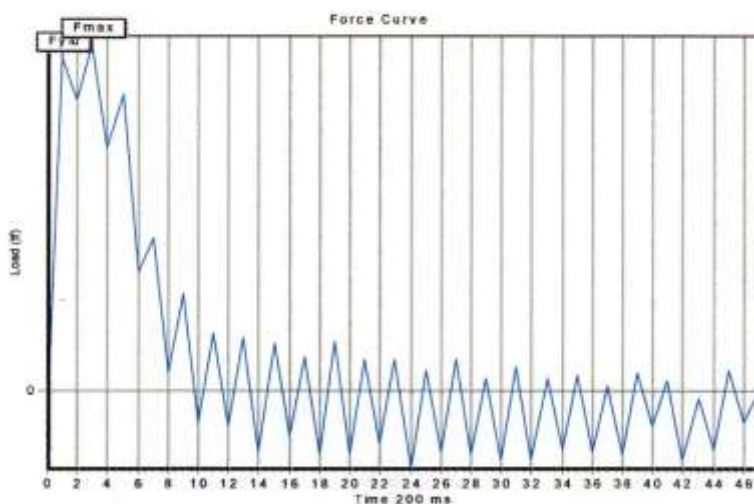


LABORATORIUM METALURGI

JURUSAN TEKNIK MESIN - FTI - INSTITUT TEKNOLOGI 10 NOPEMBER
SURABAYA - INDONESIA

DATE : 21-December-2017
SAMPLE NUMBER : M1 2/2
SPESIFICATION : SNI
SAMPLE TYPE : SQUARE
CUSTOMER : TITIS

SIZE (mm) : 51.09 X 51.17
AREA (mm²) : 2614.28
OPERATOR : mantri
TIME : 14.25



Fmax (tf) : 1.15
Fy (tf) : 1.10
Ratio : 1.04
Notes :

Tensile Strength (kgf/mm²) : 0.44
Yield Strength (kgf/mm²) : 0.42
Elongation (%) : 0.00

TENSION TEST REPORT

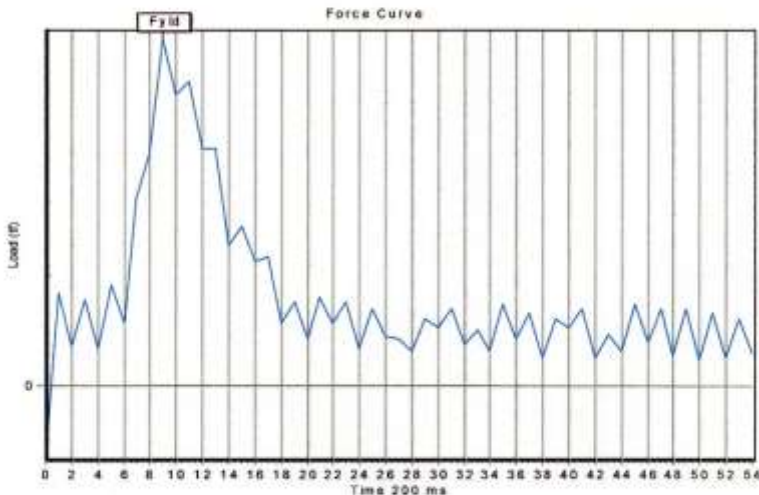


LABORATORIUM METALURGI

JURUSAN TEKNIK MESIN - FTI - INSTITUT TEKNOLOGI 10 NOPEMBER
SURABAYA - INDONESIA

DATE : 21-December-2017
SAMPLE NUMBER : M2 1/2
SPESIFICATION : SNI
SAMPLE TYPE : SQUARE
CUSTOMER : TITIS

SIZE (mm) : 49.65 X 51.5
AREA (mm²) : 2556.98
OPERATOR : mantri
TIME : 14.26



Fmax (tf) : 1.29
Fyild (tf) : 1.29
Ratio : 1.00
Notes :

Tensile Strength (kgf/mm²) : 0.50
Yield Strength (kgf/mm²) : 0.50
Elongation (%) : 0.00

TENSION TEST REPORT

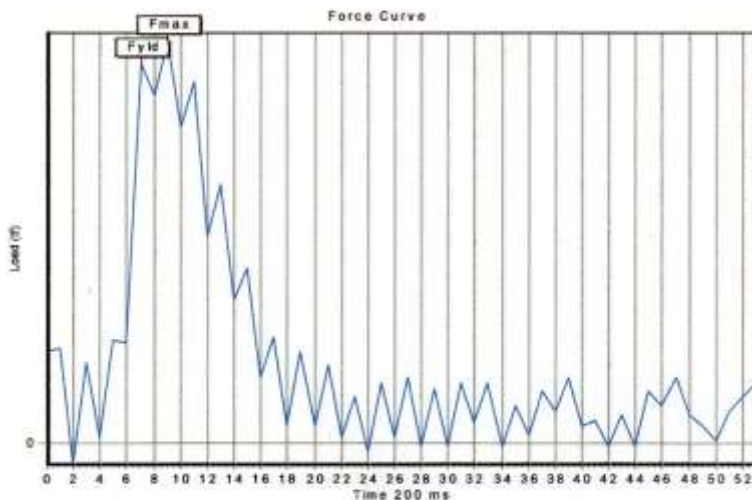


LABORATORIUM METALURGI

JURUSAN TEKNIK MESIN - FTI - INSTITUT TEKNOLOGI 10 NOPEMBER
SURABAYA - INDONESIA

DATE : 21-December-2017
SAMPLE NUMBER : M2 2/2
SPESIFICATION : SNI
SAMPLE TYPE : SQUARE
CUSTOMER : TITIS

SIZE (mm) : 51.8 X 50.89
AREA (mm²) : 2615.6
OPERATOR : mantri
TIME : 14:28



Fmax (tf)	: 1.22	Tensile Strength (kgf/mm ²)	: 0.47
Fyld (tf)	: 1.15	Yield Strength (kgf/mm ²)	: 0.44
Ratio	: 1.06	Elongation (%)	: 0.00
Notes	:		

TENSION TEST REPORT

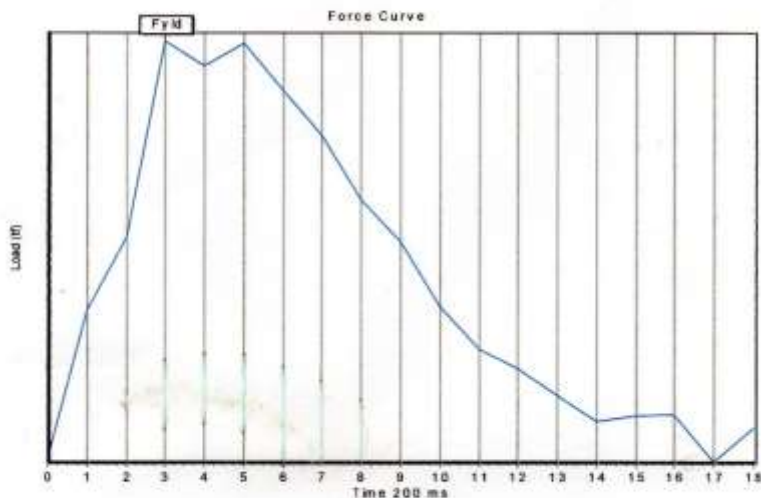


LABORATORIUM METALURGI

JURUSAN TEKNIK MESIN - FTI - INSTITUT TEKNOLOGI 10 NOPEMBER
SURABAYA - INDONESIA

DATE : 21-December-2017
SAMPLE NUMBER : M3 1/2
SPESIFICATION : SNI
SAMPLE TYPE : SQUARE
CUSTOMER : TITIS

SIZE (mm) : 52.06 X 50.85
AREA (mm²) : 2647.25
OPERATOR : mantri
TIME : 14:20



Fmax (tf)	: 2.19	Tensile Strength (kgf/mm ²)	: 0.83
Fyield (tf)	: 2.19	Yield Strength (kgf/mm ²)	: 0.83
Ratio	: 1.00	Elongation (%)	: 0.00
Notes	:		

TENSION TEST REPORT

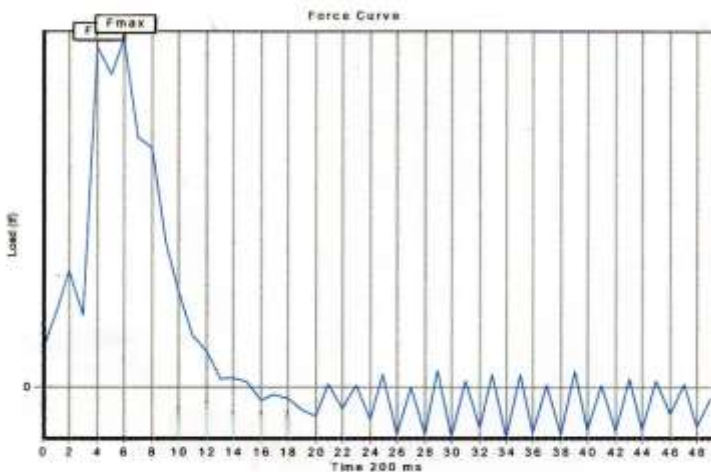


LABORATORIUM METALURGI

JURUSAN TEKNIK MESIN - FTI - INSTITUT TEKNOLOGI 10 NOPEMBER
SURABAYA - INDONESIA

DATE : 21-December-2017
SAMPLE NUMBER : M3 2/2
SPESIFICATION : SNI
SAMPLE TYPE : SQUARE
CUSTOMER : TTIS

SIZE (mm) : 51.03 X 50.73
AREA (mm²) : 2588.75
OPERATOR : mantri
TIME : 14.21



Fmax (tf) : 1.99
Fyield (tf) : 1.94
Ratio : 1.02
Notes :

Tensile Strength (kgf/mm²) : 0.77
Yield Strength (kgf/mm²) : 0.75
Elongation (%) : 0.00

TENSION TEST REPORT



LABORATORIUM METALURGI

JURUSAN TEKNIK MESIN - FTI - INSTITUT TEKNOLOGI 10 NOPEMBER
SURABAYA - INDONESIA

DATE : 21-December-2017

SAMPLE NUMBER : W1 1/2

SPEISIFICATION : SNI

SAMPLE TYPE : SQUARE

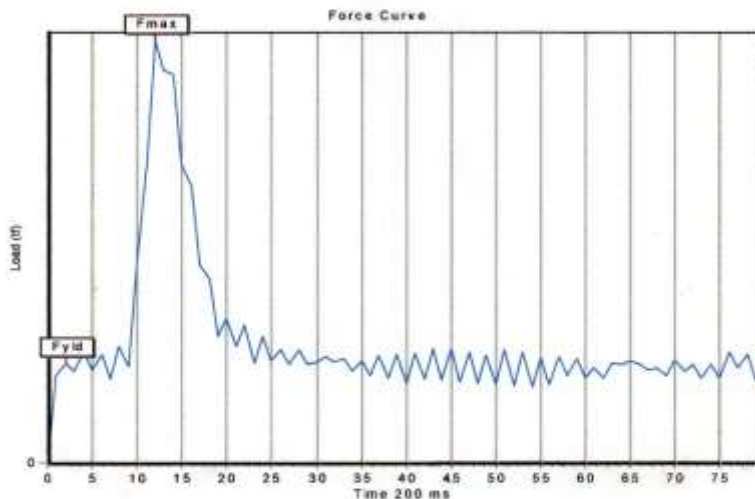
CUSTOMER : TITIS

SIZE (mm) : 50.19 X 50.91

AREA (mm²) : 2555.17

OPERATOR : mantri

TIME : 14:08



Fmax (tf) : 4.22

Fyld (tf) : 1.00

Ratio : 4.24

Notes :

Tensile Strength (kgf/mm²) : 1.65

Yield Strength (kgf/mm²) : 0.39

Elongation (%) : 0.00

TENSION TEST REPORT

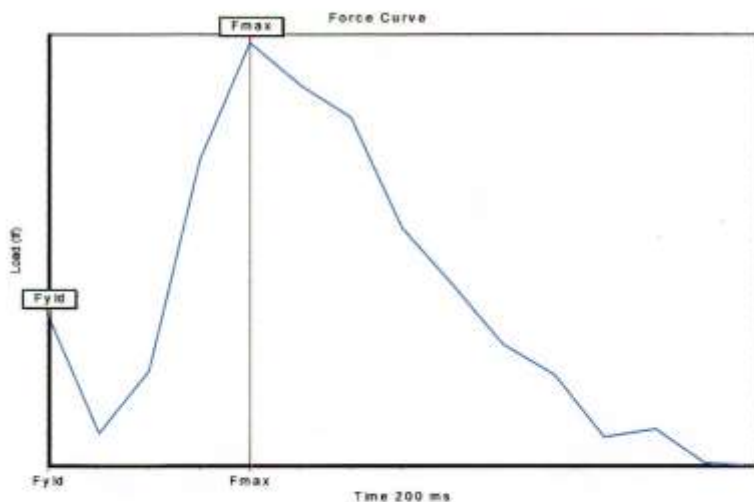


LABORATORIUM METALURGI

JURUSAN TEKNIK MESIN - FTI - INSTITUT TEKNOLOGI 10 NOPEMBER
SURABAYA - INDONESIA

DATE : 21-December-2017
SAMPLE NUMBER : W1 2/2
SPESIFICATION : SNI
SAMPLE TYPE : SQUARE
CUSTOMER : TITIS

SIZE (mm) : 50.36 X 49.72
AREA (mm²) : 2503.9
OPERATOR : mantri
TIME : 14:10



Fmax (tf)	: 2.85	Tensile Strength (kgf/mm ²)	: 1.14
Fyld (tf)	: 1.09	Yield Strength (kgf/mm ²)	: 0.44
Ratio	: 2.61	Elongation (%)	: 0.00
Notes	:		

TENSION TEST REPORT

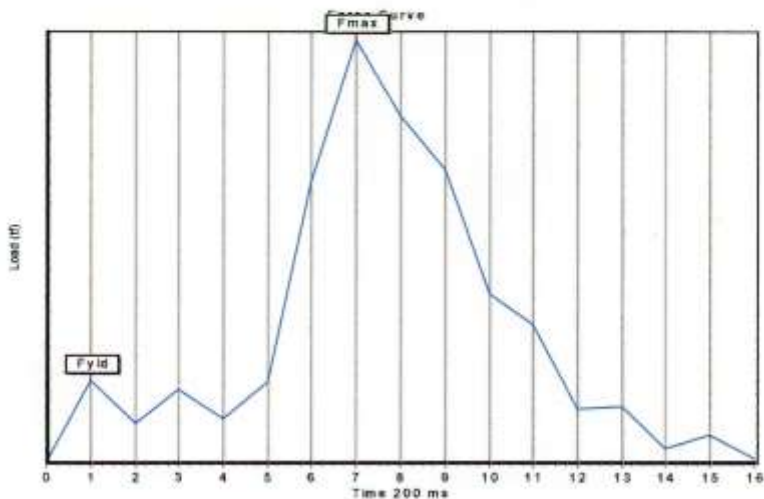


LABORATORIUM METALURGI

JURUSAN TEKNIK MESIN - FTI - INSTITUT TEKNOLOGI 10 NOPEMBER
SURABAYA - INDONESIA

DATE : 21-December-2017
SAMPLE NUMBER : W2 1/2
SPESIFICATION : SNI
SAMPLE TYPE : SQUARE
CUSTOMER : TITIS

SIZE (mm) : 51.15 X 49.78
AREA (mm²) : 2546.25
OPERATOR : mantri
TIME : 14:15



Fmax (tf)	: 4.55	Tensile Strength (kgf/mm ²)	: 1.79
Fyield (tf)	: 0.38	Yield Strength (kgf/mm ²)	: 0.38
Ratio	: 4.64	Elongation (%)	: 0.00
Notes	:		

TENSION TEST REPORT

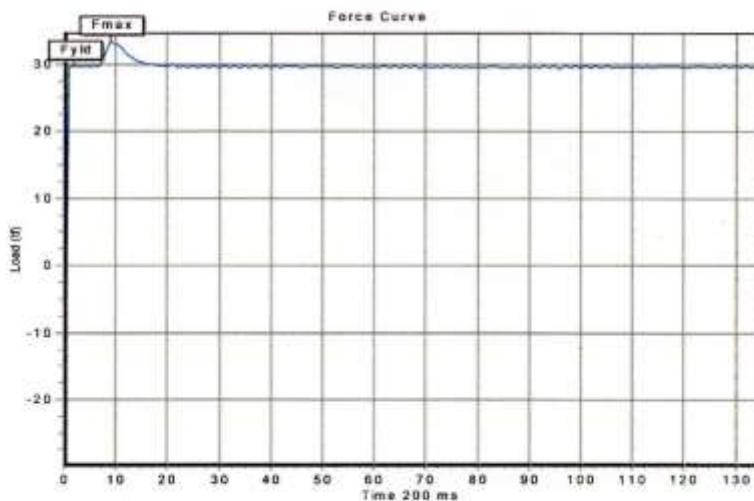


LABORATORIUM METALURGI

JURUSAN TEKNIK MESIN - FTI - INSTITUT TEKNOLOGI 10 NOPEMBER
SURABAYA - INDONESIA

DATE : 21-December-2017
SAMPLE NUMBER : W2 2/2
SPESIFICATION : SNI
SAMPLE TYPE : SQUARE
CUSTOMER : TITIS

SIZE (mm) : 49.91 X 51.09
AREA (mm²) : 2549.9
OPERATOR : mantri
TIME : 14:17



Fmax (tf) : 33.34

Fyld (tf) : 29.64

Ratio : 1.12

Notes :

Tensile Strength (kgf/mm²) : 13.08

Yield Strength (kgf/mm²) : 11.62

Elongation (%) : 0.00

TENSION TEST REPORT

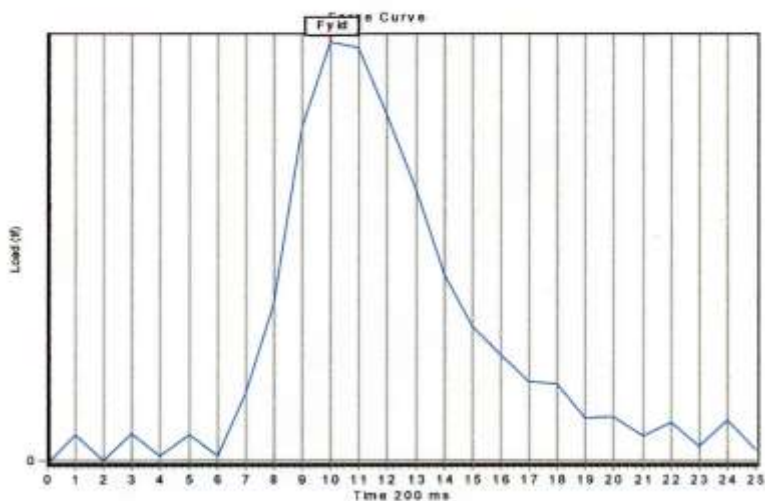


LABORATORIUM METALURGI

JURUSAN TEKNIK MESIN - FTI - INSTITUT TEKNOLOGI 10 NOPEMBER
SURABAYA - INDONESIA

DATE : 21-December-2017
SAMPLE NUMBER : W3 1/2
SPESIFICATION : SNI
SAMPLE TYPE : SQUARE
CUSTOMER : TITIS

SIZE (mm) : 50.8 X 51.66
AREA (mm²) : 2624.33
OPERATOR : mantri
TIME : 14:11



Fmax (tf) : 5.34
Fyld (tf) : 5.34
Ratio : 1.00
Notes :

Tensile Strength (kgf/mm²) : 2.03
Yield Strength (kgf/mm²) : 2.03
Elongation (%) : 0.00

TENSION TEST REPORT

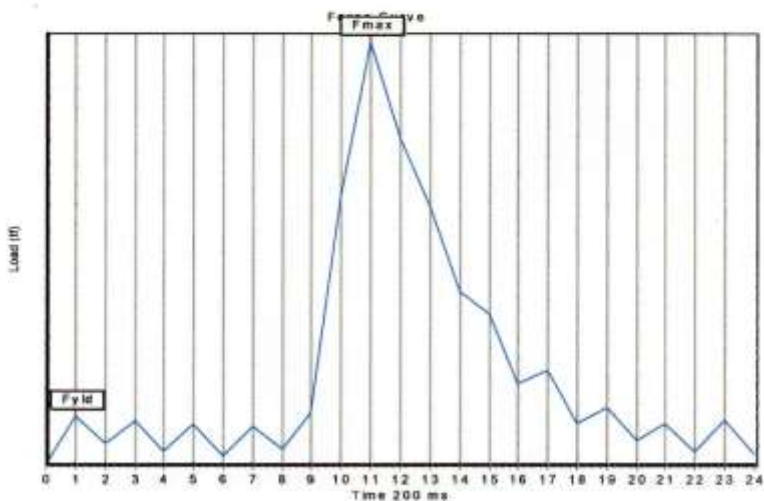


LABORATORIUM METALURGI

JURUSAN TEKNIK MESIN - FTI - INSTITUT TEKNOLOGI 10 NOPEMBER
SURABAYA - INDONESIA

DATE : 21-December-2017
SAMPLE NUMBER : W3 2/2
SPESIFICATION : SNI
SAMPLE TYPE : SQUARE
CUSTOMER : TITIS

SIZE (mm) : 51.06 X 50.45
AREA (mm²) : 2575.98
OPERATOR : mantri
TIME : 14:13



Fmax (tf)	: 4.89	Tensile Strength (kgf/mm ²)	: 1.90
Fyld (tf)	: 0.56	Yield Strength (kgf/mm ²)	: 0.22
Ratio	: 8.73	Elongation (%)	: 0.00
Notes	:		

Lampiran 2 - Tabel *Thermophysical properties of selected metallic solids*

TABLE A.1 Thermophysical Properties of Selected Metallic Solids^a

Composition	Melting Point (K)	Properties at 300 K				Properties at Various Temperatures (K)									
		ρ (kg/m ³)	C_p (J/kg·K)	k (W/m·K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	100	200	400	600	800	1000	1200	1500	2000	2500
Aluminum															
Pure	933	2702	903	237	97.1	302	237	240	231	218					
Alloy 2024-T6 (4.5% Cu, 1.5% Mg, 0.6% Mn)	775	2770	875	177	73.0	65	163	186	186	1146					
Alloy 195, Cast (4.5% Cu)	2790	883	168		68.2			174	185						
Beryllium	1550	1850	1825	200	59.2	990	301	161	126	105	90.8	78.7			
					203	1114	2191	2694	2823	3018	3227	3519			
Bismuth	545	9780	122	7.86	6.59	16.5	8.69	7.04							
					112	120	127								
Boron	2573	2300	1107	27.0	9.76	190	53.5	16.8	10.6	9.60	9.85				
					128	600	1463	1892	2160	2338					
Cadmium	594	8650	231	96.8	48.4	203	98.3	94.7							
					198	222	242								
Chromium	2118	7160	449	93.7	29.1	159	111	90.9	80.7	71.3	65.4	61.9	57.2	49.4	
					192	384	484	542	581	616	682	779	837		
Cobalt	1769	8862	421	98.2	26.6	167	122	85.4	57.4	58.2	52.1	48.3	42.5		
					236	379	450	503	550	628	733	674			
Copper															
Pure	1358	8933	385	401	117	482	413	393	379	366	352	339			
					252	356	397	417	433	451	480				
Commercial bronze (90% Cu, 10% Al)	1293	8800	420	52	14	42	52	59							
Phosphor gear bronze (89% Cu, 11% Sn)	1104	8780	355	54	17	41	65	74							
Cartridge brass (70% Cu, 30% Zn)	1188	8530	380	110	33.9	75	95	137	149						
Constantan (55% Cu, 45% Ni)	1493	8920	384	23	6.71	17	19								
					237	362	360	385	425						
Germanium	1211	5560	322	59.9	34.7	232	96.8	43.2	27.3	19.8	17.4				
						190	290	337	348	357	375	395			

Lampiran 3 – Hasil Pengujian Konduktivitas Panas

SPESIMEN M1

NO	Thermostat	T1 (* C)	T2 (* C)	T3(* C)	T4(* C)	T5(* C)	T6(* C)	A	V
	Setting (* C)								
1	0	28	28	28	27,9	27,9	28	1,4	210
2	100	104,5	102,8	94,9	70,8	38,3	37,4	1,4	210
3	100	104,1	102,4	94,5	70,2	37,8	36,7	1,4	210

HASIL PERHITUNGAN

(Kcu-413)	dtcu	dtsp	A(m2)	Lcu(m)	Lsp(m)
-2,335	1,7	24,1	0,001256	0,1	0,01
-2,375	1,7	24,3	0,001256	0,1	0,01

NO	Setting Thermost	tembaga 1			spesimen	
		T avg	K	Q	K	k*faktor koreksi
1	0					
2	100	376,65	410,67	8,77	2,90	2,578158
3	100	376,25	410,63	8,77	2,87	2,556689815

SPESIMEN M2

NO	Thermostat	T1 (* C)	T2 (* C)	T3(* C)	T4(* C)	T5(* C)	T6(* C)	A	V
	Setting (* C)								
1	0	28	28	28	27,9	27,9	28	1,4	210
2	100	99,3	98,2	89,1	74,4	34,4	33,9	1,4	210
3	100	99,4	98,2	89,4	74,2	34,4	33,8	1,4	210

HASIL PERHITUNGAN

(Kcu-413)	dtcu	dtsp	A(m2)	Lcu(m)	Lsp(m)
-2,825	1,1	14,7	0,001256	0,1	0,01
-2,82	1,2	15,2	0,001256	0,1	0,01

NO	Setting Thermost	tembaga 1			spesimen	
		T avg	K	Q	K	k*faktor koreksi
1	0					
2	100	371,75	410,18	5,67	3,07	2,731710
3	100	371,80	410,18	6,18	3,24	2,882054211

SPESIMEN M3

NO	Thermostat	T1 (* C)	T2 (* C)	T3(* C)	T4(* C)	T5(* C)	T6(* C)	A	V
	Setting (* C)								
1	0	28	28	28	27,9	27,9	28	1,4	210
2	100	101,3	100,3	91,9	81	31,4	30,9	1,4	210
3	100	101,4	100,3	92,3	81,2	37	36	1,4	210

HASIL PERHITUNGAN

(Kcu-413)	dtcu	dtsp	A(m2)	Lcu(m)	Lsp(m)
-2,62	1	10,9	0,001256	0,1	0,01
-2,615	1,1	11,1	0,001256	0,1	0,01

NO	Setting Thermost	tembaga 1			spesimen	
		T avg	K	Q	K	k*faktor koreksi
1	0					
2	100	373,80	410,38	5,15	3,76	3,350809
3	100	373,85	410,39	5,67	4,07	3,619521757

SPESIMEN B1

NO	Thermostat	T1 (* C)	T2 (* C)	T3(* C)	T4(* C)	T5(* C)	T6(* C)	A	V
	Setting (* C)								
1	0	28	28	28	27,9	27,9	28	1,4	210
2	100	103,7	102,5	92,1	76,3	36,4	35,9	1,4	210
3	100	103,8	102,6	92,2	76,6	36,5	35,9	1,4	210

HASIL PERHITUNGAN

(Kcu-413)	dtcu	dtsp	A(m2)	Lcu(m)	Lsp(m)
-2,39	1,2	15,8	0,001256	0,1	0,01
-2,38	1,2	15,6	0,001256	0,1	0,01

NO	Setting Thermost	tembaga 1			spesimen	
		T avg	K	Q	K	k*faktor koreksi
1	0					
2	100	376,10	410,61	6,19	3,12	2,775516
3	100	376,20	410,62	6,19	3,16	2,811167692

SPESIMEN

B2

NO	Thermostat	T1 (° C)	T2 (° C)	T3 (° C)	T4 (° C)	T5 (° C)	T6 (° C)	A	V
	Setting (° C)								
1	0	28	28	28	27,9	27,9	28	1,4	210
2	100	102,8	101,6	83,5	70,2	36,1	35,5	1,4	210
3	100	102,9	101,7	83,5	70,3	36,2	35,5	1,4	210

HASIL PERHITUNGAN

(Kcu-413)	dtcu	dtsp	A(m2)	Lcu(m)	Lsp(m)
-2,48	1,2	13,3	0,001256	0,1	0,01
-2,47	1,2	13,2	0,001256	0,1	0,01

NO	Setting Thermost	tembaga 1			spesimen	
		T avg	K	Q	K	k*faktor koreksi
1	0					
2	100	375,20	410,52	6,19	3,70	3,296506
3	100	375,30	410,53	6,19	3,73	3,321560909

SPESIMEN

B3

NO	Thermostat	T1 (° C)	T2 (° C)	T3 (° C)	T4 (° C)	T5 (° C)	T6 (° C)	A	V
	Setting (° C)								
1	0	28	28	28	27,9	27,9	28	1,4	210
2	100	103,2	102,2	80,2	71,2	36,1	35,6	1,4	210
3	100	103,3	102,3	80,3	71,3	36,1	35,5	1,4	210

HASIL PERHITUNGAN

(Kcu-413)	dtcu	dtsp	A(m2)	Lcu(m)	Lsp(m)
-2,43	1	9	0,001256	0,1	0,01
-2,42	1	9	0,001256	0,1	0,01

NO	Setting Thermost	tembaga 1			spesimen	
		T avg	K	Q	K	k*faktor koreksi
1	0					
2	100	375,70	410,57	5,16	4,56	4,060081
3	100	375,80	410,58	5,16	4,56	4,06018

SPESIMEN W1

NO	Thermostat	T1 (* C)	T2 (* C)	T3(* C)	T4(* C)	T5(* C)	T6(* C)	A	V
	Setting (° C)								
1	0	28	28	28	27,9	27,9	28	1,4	210
2	100	101,7	100,3	82	66,1	36,9	36,2	1,4	210
3	100	101,9	100,5	82,1	66,5	37,1	36,3	1,4	210

HASIL PERHITUNGAN

(Kcu-413)	dtcu	dtsp	A(m2)	Lcu(m)	Lsp(m)
-2,6	1,4	15,9	0,001256	0,1	0,01
-2,58	1,4	15,6	0,001256	0,1	0,01

NO	Setting Thermost	tembaga 1			spesimen	
		T avg	K	Q	K	k*faktor koreksi
1	0					
2	100	374,00	410,40	7,22	3,61	3,216091
3	100	374,20	410,42	7,22	3,68	3,278098205

SPESIMEN W2

NO	Thermostat	T1 (* C)	T2 (* C)	T3(* C)	T4(* C)	T5(* C)	T6(* C)	A	V
	Setting (° C)								
1	0	28	28	28	27,9	27,9	28	1,4	210
2	100	103,9	102,4	84,7	69,5	37,3	36,5	1,4	210
3	100	103,9	102,4	84,8	69,6	37,3	36,6	1,4	210

HASIL PERHITUNGAN

(Kcu-413)	dtcu	dtsp	A(m2)	Lcu(m)	Lsp(m)
-2,385	1,5	15,2	0,001256	0,1	0,01
-2,385	1,5	15,2	0,001256	0,1	0,01

NO	Setting Thermost	tembaga 1			spesimen	
		T avg	K	Q	K	k*faktor koreksi
1	0					
2	100	376,15	410,62	7,74	4,05	3,606388
3	100	376,15	410,62	7,74	4,05	3,606388322

SPESIMEN W3

NO	Thermostat	T1 (* C)	T2 (* C)	T3(* C)	T4(* C)	T5(* C)	T6(* C)	A	V
	Setting (* C)								
1	0	28	28	28	27,9	27,9	28	1,4	210
2	100	101,6	100,1	79,2	67,2	36,7	35,9	1,4	210
3	100	102	100,5	79,3	67,3	36,8	36	1,4	210

HASIL PERHITUNGAN

(Kcu-413)	dtcu	dtsp	A(m2)	Lcu(m)	Lsp(m)
-2,615	1,5	12	0,001256	0,1	0,01
-2,575	1,5	12	0,001256	0,1	0,01

NO	Setting Thermost	tembaga 1			spesimen	
		T avg	K	Q	K	k*faktor koreksi
1	0					
2	100	373,85	410,39	7,73	5,13	4,565533

BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Surabaya, 10 Juni 1993, merupakan anak tunggal dari pasangan suami istri Adi Kusno dan Siti Zulaikah. Pendidikan formal yang telah ditempuh yaitu tahun 1998-1999 bersekolah di TK Kartini, tahun 1999-2005 melanjutkan di SDN Semolowaru I -261, Kemudian tahun 2005-2008 melanjutkan ke SMPN 19 Surabaya, tahun 2008-2011 melanjutkan ke SMAN 20 Surabaya dan tahun 2011 melanjutkan pendidikannya di Perguruan Tinggi Negeri di Surabaya dengan mengambil Program Studi D3 Teknik Mesin FTI-ITS. Setelah lulus D3 Teknik Mesin pada tahun 2015, penulis melanjutkan di S-1 Teknik Mesin FTI-ITS. Pada akhir semester, penulis menyelesaikan tugas akhir yang berhubungan dengan bidang studi metalurgi. Untuk informasi mengenai tugas akhir ini pembaca dapat menghubungi penulis via email jnyuniar@gmail.com.